



António Afra Gonçalves Pedro

Licenciatura em Ciências de Engenharia Mecânica

Estudo de Melhoria de um Sistema de Ensaio de Reguladores de Oxigénio de Aeronaves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientadora: Professora Doutora Helena Vítorovna
Guitiss Navas, FCT-UNL

Coorientadora: Professora Doutora Teresa Leonor
Ribeiro Cardoso Martins Morgado, IPT-ESTA

Júri:

Presidente: Prof.^a Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos,
FCT NOVA

Vogais: Prof.^a Doutora Maria da Glória Pereira Antunes,
Escola Superior de Tecnologia, Instituto Politécnico de
Setúbal
Prof. Doutor Luís Filipe Figueira Brito de Palma, FCT
NOVA
Engenheiro Manuel Isidro Duarte Silva, OGMA –
Indústria Aeronáutica de Portugal, S.A.
Prof.^a Doutora Helena Vítorovna Guitiss Navas, FCT
NOVA

Copyright, 2016, António Afra Gonçalves Pedro, FCT-UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às minhas orientadoras, Professora Doutora Helena Navas e Professora Doutora Teresa Morgado pela oportunidade de estágio na OGMA e pela sua permanente disponibilidade, orientação e incentivo ao longo deste trabalho.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pelo contributo para a minha formação académica e pessoal.

Ao supervisor do meu estágio, Eng.º Duarte Silva, da OGMA, pela orientação incansável, disponibilidade, conselho e visão que sempre ofereceu.

A toda a equipa de manutenção de componentes, engenheiros e técnicos, pela ajuda e partilha de conhecimento sempre despendida.

À minha família pelo apoio, motivação e paciência que sempre ofereceram.

Aos meus amigos de longa data pelo companheirismo, boa disposição e momentos de descontração.

À minha namorada pelo incentivo, paciência e apoio sempre disponibilizado.

Resumo

A presente dissertação foi desenvolvida no âmbito do estágio curricular realizado na OGMA – Indústria Aeronáutica S.A.

Um antigo equipamento de ensaio da área de manutenção de componentes da OGMA encontrava-se fora de serviço, pelo facto dos seus medidores de caudal não respeitarem os requisitos mínimos de precisão exigidos pela respetiva documentação técnica.

Com o objetivo de aumentar a precisão e modernizar o sistema de caudalímetros de fluxo laminar, deste equipamento de ensaio, foi proposto um projeto de melhoria tecnológica do sistema em causa.

O projeto constou no desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados (SAD) para ser associado ao sistema de caudalímetros de modo a torná-lo autónomo. O SAD recolhe as variáveis do processo e executa cálculos em tempo real originando leituras de caudal em formato numérico e gráfico permitindo uma melhor interpretação do utilizador.

Foi desenvolvido um modelo de simulação de incertezas, com o objetivo de estimar a precisão do novo sistema de medição de caudal (caudalímetro e SAD). Posteriormente, foram executadas calibrações aos MEMS (*Microelectromechanical Systems*), que compõem o SAD, e ao sistema desenvolvido, de acordo com as normas (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement-GUM*).

Os resultados observados nas calibrações, permitem concluir que os MEMS utilizados são mais precisos do que aquilo que a sua documentação técnica afirma. O valor da incerteza expandida obtido na calibração do sistema desenvolvido é inferior ao da precisão mínima exigida pela documentação técnica do equipamento de ensaio, o que permite concluir que este sistema é adequado para substituir o sistema inicial.

A principal vantagem da melhoria proposta neste projeto recai sobre o fator custo. Sendo que após uma análise de investimento efetuada, se chegou à conclusão que este projeto permite uma alternativa de investimento que reduz em grande parte o valor que a empresa previa investir num caudalímetro disponível no mercado.

Palavras chave: Caudalímetro de fluxo laminar, Regulador de oxigénio, Banco de ensaio, MEMS, Metrologia, Caudal *standard*

Abstract

The present dissertation was developed under the curricular internship held at OGMA - Indústria Aeronáutica S.A.

A former test equipment of OGMA's component maintenance area was out of service, because their flow meters weren't meeting the minimum requirements of accuracy required by the relevant technical documentation.

In order to increase the accuracy and modernize the laminar flowmeter system, of this test equipment, it was proposed a technological improvement project of this system.

The project consisted in developing a data acquisition system (DAS) to be associated with the flowmeter system in order to make it automatic. The DAS collects the process variables and performs real time calculations, generating flow measurement in numerical and graphical format allowing a better interpretation by the user.

A model uncertainties simulation has been developed in order to estimate the accuracy of the new flow measurement system (flowmeter and DAS). Subsequently, calibrations were performed to the MEMS (Microelectromechanical Systems), used in the DAS, and to the system developed according to the standards (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement-GUM).

The results observed in the calibrations, allow us to conclude that the MEMS are more accurate than what their technical documentation claims. The value of the expanded uncertainty obtained from the calibration of the developed system is lower than the minimum accuracy required by the technical documentation of the test equipment, which indicates that this system is suitable to replace the original system.

The main advantage of the improvement proposed by this project lies on the cost factor. Since, after an outgoing investment analysis, we concluded that this project allows an investment alternative that greatly reduces the cost that the company planned to invest on a flowmeter available on the market.

Keywords: Laminar flowmeter, Oxygen regulator, Test bench, MEMS, Metrology, Standard flow rate

Índice de Matérias

| | |
|---|----|
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1 Enquadramento e Objetivos da Dissertação | 1 |
| 1.2 Estrutura da Dissertação | 2 |
| 2. Fundamentos Teóricos | 3 |
| 2.1 Atmosfera Padrão..... | 3 |
| 2.2 Fisiologia do Ser Humano em Altitude | 8 |
| 2.3 Sistemas de Fornecimento de Oxigénio | 10 |
| 2.4 Reguladores de Oxigénio | 12 |
| 3. Medição de Caudal..... | 15 |
| 3.1 Introdução ao Conceito de Caudal..... | 15 |
| 3.2 Tipos de Medidores de Caudal | 16 |
| 3.3 Caudal Volumétrico <i>Standard</i> | 20 |
| 4. Processo Inicial de Medição de Caudal na Empresa | 23 |
| 4.1 OGMA – Indústria Aeronáutica da Portugal, S.A..... | 23 |
| 4.2 O Banco de Ensaio de Reguladores de Oxigénio | 25 |
| 4.3 Análise Crítica do Procedimento de Ensaio Inicial | 27 |
| 4.4 Caracterização dos Caudalímetros Adquiridos pela Empresa..... | 29 |
| 5. Propostas de Melhoria do Sistema de Medição de Caudal | 31 |
| 5.1 Montagens Experimentais | 31 |
| 5.2 Análise de Soluções | 36 |
| 5.3 Sistema de Aquisição de Dados | 39 |
| 5.4 Solução de Melhoria Tecnológica | 45 |
| 6. Cálculo de Incertezas de Medição | 49 |
| 6.1 Princípio da Avaliação da Incerteza de Medição..... | 49 |
| 6.2 Modelo de Simulação de Incertezas | 56 |
| 6.3 Calibração do Sistema de Instrumentação..... | 58 |
| 7. Análise e Discussão de Resultados | 67 |
| 8. Conclusão e Trabalhos Futuros | 71 |
| Bibliografia..... | 73 |
| Anexos | 77 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2. 1 – Porção Infinitesimal da Atmosfera | 4 |
| Figura 2. 2 – Variação da Temperatura na Atmosfera Padrão | 5 |
| Figura 2. 3 – Variação da Pressão na Atmosfera Padrão | 6 |
| Figura 2. 4 – Distribuição Percentual de Gases na Atmosfera | 8 |
| Figura 2. 5 – PPO2 em Função da Altitude | 9 |
| Figura 2. 6 – Eficiência do Ser Humano em Altitude | 11 |
| Figura 2. 7 – Regulador de Oxigênio de Pressão de Comando | 12 |
| Figura 2. 8 – Painel de um RO de Pressão de Comando..... | 13 |
| Figura 2. 9 – Esquema Funcional de um RO de Pressão de Comando | 14 |
| Figura 3. 1 – Caudal Volumétrico Através de uma Suprefície Arbitrária | 15 |
| Figura 3. 2 – Classificação de Caudalímetros..... | 16 |
| Figura 3. 3 – Elemento de Fluxo Laminar | 17 |
| Figura 3. 4 – Corte Longitudinal de um Caudalímetro de Fluxo Laminar..... | 18 |
| Figura 3. 5 – Caudalímetro de Transferência de Calor..... | 19 |
| Figura 3. 6 – Caudalímetro de Sonda Aquecida..... | 20 |
| Figura 3. 7 – Caudal Volumétrico <i>Standard</i> | 21 |
| Figura 4. 1 – Logotipo da Empresa | 23 |
| Figura 4. 2 – Vista Aérea da Empresa | 23 |
| Figura 4. 3 – Organograma da OGMA | 24 |
| Figura 4. 4 – Organograma dos Componentes | 24 |
| Figura 4. 5 – Câmara Barométrica | 25 |
| Figura 4. 6 – Diagrama Funcional do BE de RO | 26 |
| Figura 4. 7 – Banco de Ensaio em Fase de Modificações..... | 27 |
| Figura 4. 8 – CFL Originais do BE | 28 |
| Figura 4. 9 – Coluna de Líquido Indicadora Graduada em Litros por Minuto..... | 28 |
| Figura 4. 10 – CFL Adaptados no BE | 28 |
| Figura 4. 11 – <i>Red-y-Smart</i> | 29 |
| Figura 5. 1 – Montagem Exprimental 1 | 32 |
| Figura 5. 2 – Montagem Exprimental 2 | 33 |
| Figura 5. 3 – Curva de Caudal Volumétrico <i>Standard</i> em Função do Diferencial de Pressão | 34 |
| Figura 5. 4 – Curva de Calibração do CFL em Condições <i>Standard</i> | 35 |
| Figura 5. 5 – <i>SE0230 Support Equipment – Regulator Test Stand</i> | 36 |
| Figura 5. 6 – <i>Model OTS570 Automated Portable Oxygen Components Test Set</i> | 37 |
| Figura 5. 7 – CFL em Aço Inox da <i>CME</i> | 38 |
| Figura 5. 8 – Sistema Completo com Display e Sonda de Temperatura | 38 |
| Figura 5. 9 – Sistema de Aquisição de Dados | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 5. 10 – <i>MS5611-01BA03</i> | 40 |
| Figura 5. 11 – <i>MPX5004DP</i> | 41 |
| Figura 5. 12 – <i>Arduino Leonardo</i> | 41 |
| Figura 5. 13 – Micro-Processador <i>Atmega32u4</i> | 42 |
| Figura 5. 14 – Pinos de Alimentação do <i>Arduino Leonardo</i> | 43 |
| Figura 5. 15 – Ambiente de Programação <i>Arduino IDE</i> | 44 |
| Figura 5. 16 – Montagem do Sistema de Instrumentação | 45 |
| Figura 5. 17 – Sensor <i>MS56-11BA03</i> em Funcionamento, no Interior da Câmara Barométrica do BE | 46 |
| Figura 5. 18 – Esquema Simplificado da Integração do Novo Sistema de Instrumentação no BE | 47 |
| Figura 5. 19 – T | 47 |
| Figura 5. 20 – Integração da Solução de Instrumentação no BE | 48 |
| Figura 6. 1 – Distribuição Retangular..... | 52 |
| Figura 6. 2 – Distribuição Triangular | 53 |
| Figura 6. 3 – Distribuição Normal..... | 53 |
| Figura 6. 4 – <i>Ruska 7750i</i> | 58 |
| Figura 6. 5 – Montagem Utilizada na Calibração do Sensor <i>MS5611-01BA03</i> | 59 |
| Figura 6. 6 – Ligação do <i>Arduino</i> ao Interior da Câmara Barométrica..... | 59 |
| Figura 6. 7 – Montagem Efetuada para a Calibração do Sensor <i>MPXV500DP</i> | 61 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2. 1 – Atmosfera Padrão, Condições ao Nível do Mar | 3 |
| Tabela 2. 2 – Condições Atmosféricas em 6 Altitudes Distintas | 8 |
| Tabela 4. 1 – Características do CMDT | 30 |
| Tabela 4. 2 – Condições de Protocolo de Calibração..... | 30 |
| Tabela 5. 1 – Comparação Entre as Leituras do CFL1 e CMDT1 | 33 |
| Tabela 5. 2 – Diferencial de Pressão vs Caudal Volumétrico <i>Standard</i> | 34 |
| Tabela 5. 3 – Caudalímetros Digitais Inteligentes da <i>CME</i> | 38 |
| Tabela 5. 4 – Ficha de Dados do <i>MS5611-01BA03</i> | 40 |
| Tabela 5. 5 – Ficha de Dados do <i>MPXV5004DP</i> | 41 |
| Tabela 5. 6 – Ficha de Dados do Microprocessador <i>Atmega32u4</i> | 42 |
| Tabela 6. 1 – Relação Entre Fator de Expansão e Graus de Liberdade Efetivos | 55 |
| Tabela 6. 2 – Simulações que Maximizam o Erro de Caudal Volumétrico Atual..... | 57 |
| Tabela 6. 3 – Simulações que Maximizam o Erro de Caudal Volumétrico <i>Standard</i> ... | 57 |
| Tabela 6. 4 – Ensaio de Calibração ao Sensor de Pressão | 60 |
| Tabela 6. 5 – Cálculo de Incerteza de Medição Associada à Pressão | 60 |
| Tabela 6. 6 – Ensaio de Calibração ao Sensor de Pressão Diferencial..... | 61 |
| Tabela 6. 7 – Cálculo de Incerteza de Medição Associada ao Diferencial de Pressão | 62 |
| Tabela 6. 8 – Ensaio de Calibração ao Sistema de Medição de Caudal (0 kft) | 63 |
| Tabela 6. 9 – Ensaio de Calibração ao Sistema de Medição de Caudal (30 kft) | 63 |
| Tabela 6. 10 – Ensaio de Calibração ao Sistema de Medição de Caudal (50 kft) | 63 |
| Tabela 6. 11 – Cálculo de Incerteza de Medição Associada ao Caudal | 65 |
| Tabela 7. 1 – Ficha de Calibração do Sensor de Pressão Absoluta..... | 67 |
| Tabela 7. 2 – Ficha de Calibração do Sensor Altimétrico | 67 |
| Tabela 7. 3 – Ficha de Calibração do Sensor de Pressão Diferencial | 67 |
| Tabela 7. 4 – Ficha de Calibração do Sistema de Medição de Caudal (0 kft) | 68 |
| Tabela 7. 5 – Ficha de Calibração do Sistema de Medição de Caudal (30 kft)..... | 68 |
| Tabela 7. 6 – Ficha de Calibração do Sistema de Medição de Caudal (50 kft)..... | 68 |
| Tabela 7. 7 – Especificação do Fabricante vs Cálculo de Incerteza (Pressão)..... | 69 |
| Tabela 7. 8 – Especificação do Fabricante vs Cálculo de Incerteza (Caudal) | 69 |

Acrónimos e Siglas

A/D – Analógicas ou Digitais

ADC – Conversor Analógico Digital

ADTS – *Air Data Test Set*

BE – Banco de Ensaio

CFL – Caudalímetro de Fluxo Laminar

CMDT – Caudalímetro Mássico de Dissipação Térmica

DAQ – *Data Acquisition*

DAS / SAD – *Data Acquisition System* / Sistema de Aquisição de Dados

EA – *European Co-operation for Accreditation*

EFL – Elemento de Fluxo Laminar

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

fs – *Full Scale*

GOX – *Gaseous Oxygen*

GUM – *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*

IDE – *Integrated Development Environment*

ISA – *International Standard Atmosphere*

LabVIEW – *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*

LOX – *Liquid Oxygen*

MEMS – *Microelectromechanical Systems*

MLP – Modulação por Largura de Pulso

MRO – *Maintenance, Repair and Operating*

MSL – *Mean Sea Level*

OBOGS – *Onboard Oxygen Generating Systems*

OGMA MCO – Área de Manutenção de Componentes da OGMA

RO – Regulador de Oxigénio

SI – Sistema Internacional de Unidades

VI – *Virtual Instruments*

Simbologia

A – área da secção

a – valor da incerteza

a_+ – valor limite superior

a_- – valor limite inferior

B, C – constantes de calibração

c_i – coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza de entrada

c_p – coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza p

c_T – coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza T

$c_{\Delta p}$ – coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza Δp

D – diâmetro interno da tubagem

dA – infinitésimo de área

dh – variação de altitude

dp – variação de pressão

dt – infinitésimo de tempo

dv – infinitésimo de volume

g – aceleração da gravidade

h – altitude

i – número de iterações (ou número de valores aleatórios gerados)

k – fator de expansão

ls – *litros standard*

\dot{m} – caudal mássico

n – número de observações

\hat{n} – vetor unitário normal a dA

PPO_2 – pressão parcial de oxigénio

p – pressão

p_a – pressão atual

p_{std} – pressão *standard*

p_0 – pressão ao nível do mar

p_{11k} – pressão na tropopausa

Q – caudal volumétrico

Q_a – caudal volumétrico atual

Q_{std} – caudal volumétrico *standard*

Q_0 – grandeza de entrada repetidamente medida

\bar{q} – média aritmética dos valores individualmente observados

q_j – valores individualmente observados
 R – constante do ar
 Re – número de Reynolds
 S – constante de Sutherland para o ar
 $s^2(q)$ – variância experimental dos valores q_j
 $s(\bar{q})$ – desvio-padrão experimental da média
 $s^2(\bar{q})$ – variância experimental da média
 T – temperatura
 T_a – temperatura atual
 T_{std} – temperatura *standard*
 T_0 – temperatura ao nível do mar
 T_{11k} – temperatura na tropopausa
 t – tempo
 U – incerteza de medição expandida
 $u(\bar{q})$ – incerteza-padrão da estimativa da grandeza \bar{q}
 $u(x_i)$ – incerteza padrão
 $u^2(x_i)$ – variância
 $u(y)$ – incerteza padrão da estimativa da grandeza de saída
 $u_i(y)$ – contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída
 $u^2(y)$ – quadrado da incerteza-padrão associado à estimativa da grandeza de saída
 u_p – incerteza-padrão da estimativa da grandeza p
 u_T – incerteza-padrão da estimativa da grandeza T
 $u_{\Delta p}$ – incerteza-padrão da estimativa da grandeza Δp
 u_{Q_a} – incerteza-padrão da estimativa da grandeza Q_a
 $u_{Q_{std}}$ – incerteza-padrão da estimativa da grandeza Q_{std}
 V – intensidade do vetor velocidade do fluido
 V_n – componente da velocidade normal à superfície dA
 V_S – tensão de alimentação
 V_M – valor medido
 V_R – valor real
 v – volume
 v_{ef} – graus de liberdade efetivos
 v_i – graus de liberdade efetivos do componente da incerteza padrão
 X_i – grandezas de entrada
 x_i – valor estimado para a grandeza de entrada

Δx – distância entre duas tomadas de pressão

Y – mensuranda ou grandeza de saída

y – valor estimado para a grandeza de saída

α – rácio de descida de temperatura na troposfera

β – constante do cálculo do coeficiente de viscosidade

ε – erro de medição

θ – ângulo entre os vetores \hat{n} e V

μ – coeficiente de viscosidade

μ_a – coeficiente de viscosidade atual

μ_{std} – coeficiente de viscosidade *standard*

ρ – massa volúmica

1. Introdução

1.1 Enquadramento e Objetivos da Dissertação

Nas últimas décadas presenciou-se um dos avanços mais rápidos da história da humanidade como reflexo da pesquisa generalizada de soluções mais eficazes. As empresas industriais necessitam de acompanhar este desenvolvimento via modernização em todas as áreas funcionais com introdução de novos procedimentos e metodologias. A OGMA - Indústria Aeronáutica, S.A., empresa com nove décadas de conhecimento e experiência no negócio de manutenção de aeronaves, acompanha a tendência, procurando melhorar as rotinas já existentes com base na utilização de novas técnicas de engenharia e novas abordagens de gestão.

Nesta ótica de melhoria contínua de procedimentos e técnicas de ensaio, surgiu uma oportunidade de estágio na área de manutenção de componentes da OGMA (OGMA - MCO).

Os objetivos iniciais do estágio eram centrados na análise dos bancos de ensaio (BE) existentes no serviço e dos procedimentos utilizados, com o objetivo de melhoria dos processos.

Ao longo desta análise, o foco das atenções voltou-se rapidamente para o BE de reguladores de oxigénio (RO), componente responsável pela diluição de ar atmosférico em condição rarefeita com oxigénio respirável, isto porque este banco apresentava graves limitações ao nível da sua instrumentação.

A situação inicial deste BE revelava um problema de precisão insuficiente no seu sistema de medição de fluxo, condição que levava a que o BE de RO ficasse fora de serviço até que se encontrasse uma alternativa ao sistema em utilização.

Os objetivos deste estudo centraram-se no aumento de precisão do sistema de caudalímetros e na sua modernização tecnológica, visto que este se encontrava desatualizado quando comparado com outras tecnologias utilizadas atualmente.

Para colmatar a desatualização tecnológica e a falta de precisão deste sistema de caudalímetros, foi efetuado um estudo no sentido de encontrar soluções eficazes, precisas e financeiramente viáveis para o problema em questão. Ao longo desse estudo surgiram algumas soluções que se encontram atualmente disponíveis no mercado que resolvem o problema na sua totalidade. No entanto, estas obrigavam a empresa a investimentos avultados. Assim, foi estudada a oportunidade de desenvolvimento de outras soluções com uma melhor relação custo-eficácia.

O projeto desenvolvido nesta dissertação oferece uma solução mais económica para o problema, em alternativa a outras soluções existentes no mercado. A solução proposta é baseada na reutilização dos caudalímetros, desatualizados tecnologicamente, existentes na empresa, acoplando-lhes um sistema de aquisição de dados, desenvolvido com propósito de automatizar o processo de medição e aumentar a precisão das suas leituras.

1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação divide-se em oito capítulos principais:

Primeiro Capítulo “Introdução”: No presente capítulo dá-se a conhecer as necessidades encontradas, as etapas desenvolvidas e os objetivos estabelecidos.

Segundo Capítulo “Fundamentos Teóricos”: Neste capítulo pretende-se informar o leitor quanto aos fundamentos teóricos que sustentam este estudo e simultaneamente possibilitar-lhe uma visão mais global do meio no qual este projeto teve influência.

Terceiro Capítulo “Medição de Caudal”: Este capítulo contempla os princípios básicos de caudal e dá a conhecer as diversas formas, atualmente utilizadas, para se medir caudal, dando maior ênfase aos dois tipos de medidores que tiveram influência direta neste trabalho.

Quarto Capítulo “Processo Inicial de Medição de Caudal na Empresa”: No referente capítulo é feita uma breve introdução à empresa na qual se realizou este estágio e posteriormente é apresentada uma análise crítica ao estado inicial do banco de ensaio de reguladores de oxigénio e às soluções intermédias que foram adotadas.

Quinto Capítulo “Propostas de Melhoria do Sistema de Medição de Caudal”: Neste capítulo é apresentada a experimentação preliminar, que permitiu desvendar as limitações do sistema inicial. Em seguida são apresentadas as alternativas existentes ao sistema, seguindo-se um processo de seleção. Por último é apresentada, detalhadamente, a alternativa levada a cabo, o seu projeto de conceção e a sua integração no BE de RO.

Sexto Capítulo “Cálculo de Incertezas de Medição”: Neste capítulo é descrita a teoria dos processos de avaliação e determinação de incerteza de medição em ensaios laboratoriais, baseada no documento *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, GUM [1]. Em seguida, é apresentado o modelo de simulação de incertezas proposto com a finalidade de estimar a precisão do sistema de medição de caudal melhorado. Por último, é detalhada a metodologia de calibração utilizada nos ensaios de calibração aos MEMS e ao sistema de medição de caudal melhorado.

Sétimo Capítulo “Análise e Discussão de Resultados”: No referente capítulo são apresentados os resultados das calibrações de cada um dos micro sensores utilizados e também os resultados da calibração do sistema final desenvolvida para três patamares de altitude. Posteriormente é feita uma análise comparativa dos valores de precisão obtidos nas calibrações e fornecidos pelo fabricante, seguida de uma análise crítica aos resultados obtidos.

Oitavo Capítulo “Conclusões e Trabalhos Futuros”: Este capítulo descreve as conclusões retiradas ao longo das várias etapas deste trabalho, e é feito um comentário conclusivo quanto à viabilidade deste equipamento. É também indicado um possível estudo futuro com vista a dar continuidade a este trabalho.

2. Fundamentos Teóricos

2.1 Atmosfera Padrão

A atmosfera da Terra é composta por uma camada de gases que a envolve, sustida pela força da gravidade. As suas características variam com a altitude, latitude, época do ano, características geográficas e até mesmo com a hora do dia. Para a indústria aeronáutica o seu conhecimento é fundamental, visto que o bom desempenho de aeronaves depende não só do próprio avião, mas também de fatores externos, ou seja, das características da sua atmosfera envolvente.

Com o propósito de melhorar o desempenho de transportes aéreos e calibrar os seus altímetros, foi desenvolvido um modelo de atmosfera de referência no qual são conhecidos os valores de pressão, temperatura, densidade, viscosidade, velocidade do som, entre outros, em função da altitude [2].

O modelo de atmosfera de referência mais comum é baseado nas condições das latitudes médias do hemisfério norte, representa a atmosfera desde a superfície da terra até aos 32 km de altitude e é conhecido por *International Standard Atmosphere* (ISA) [3].

O ar no modelo da ISA é assumido como sendo um gás perfeito (i.e. desprovido de poeira, humidade e vapor de água) e considera-se que este está em repouso em relação à Terra (i.e. não há ventos ou turbulência) [2].

A atmosfera está por convenção dividida em cinco camadas: Troposfera, Estratosfera, Mesosfera, Termosfera e Exosfera. Sendo que as duas primeiras são as mais importantes para o estudo do desempenho de aeronaves.

A ISA assume que as condições ao nível do mar (*mean sea level* - MSL) são as indicadas na tabela 2.1. Estas podem também ser designadas como condições *standard* ou de referência.

Tabela 2. 1 – Atmosfera Padrão, Condições ao Nível do Mar; Adaptada de [3]

| Grandeza | Valor |
|----------------------------|-------------------------------------|
| Pressão | 101325 Pa |
| Temperatura | 288,15 K |
| Massa volúmica | 1,225 kg/m ³ |
| Coeficiente de viscosidade | 1,78938 × 10 ⁻⁵ kg/m · s |
| Aceleração da gravidade | 9,80665 m/s ² |

A tabela ISA apresenta os seguintes pressupostos e simplificações [4]:

- Neste modelo o ar é assumido como um gás perfeito, como tal, este obedece à lei dos gases perfeitos, cuja equação é apresentada em seguida:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

p – pressão

ρ – massa volúmica

R – constante do ar ($= 287,05307 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K}$)

T – temperatura

- O ar é um fluido em repouso em relação à Terra. Podendo ser aplicável a equação fundamental da hidrostática (equação 2.2, demonstrada pela figura 2.1):

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh$$

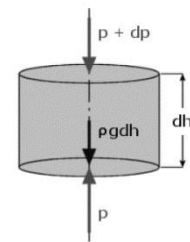
Onde:

dp – variação de pressão

g – aceleração da gravidade

dh – variação de altitude

Equação 2.2



**Figura 2. 1 – Porção Infinitesimal da Atmosfera;
Adaptada de [32]**

- Uma aproximação plausível é assumir que o valor da aceleração gravítica ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$) não varia com a altitude

O modelo da ISA permite obter grandezas como a temperatura, pressão, massa volúmica, viscosidade em função da altitude e vice-versa. A modelação de cada grandeza é apresentada em seguida:

Temperatura

O diagrama da figura 2.2 ilustra a forma como a temperatura varia na atmosfera padrão. A altitude de 11 quilómetros que separa a troposfera da estratosfera é designada por tropopausa.

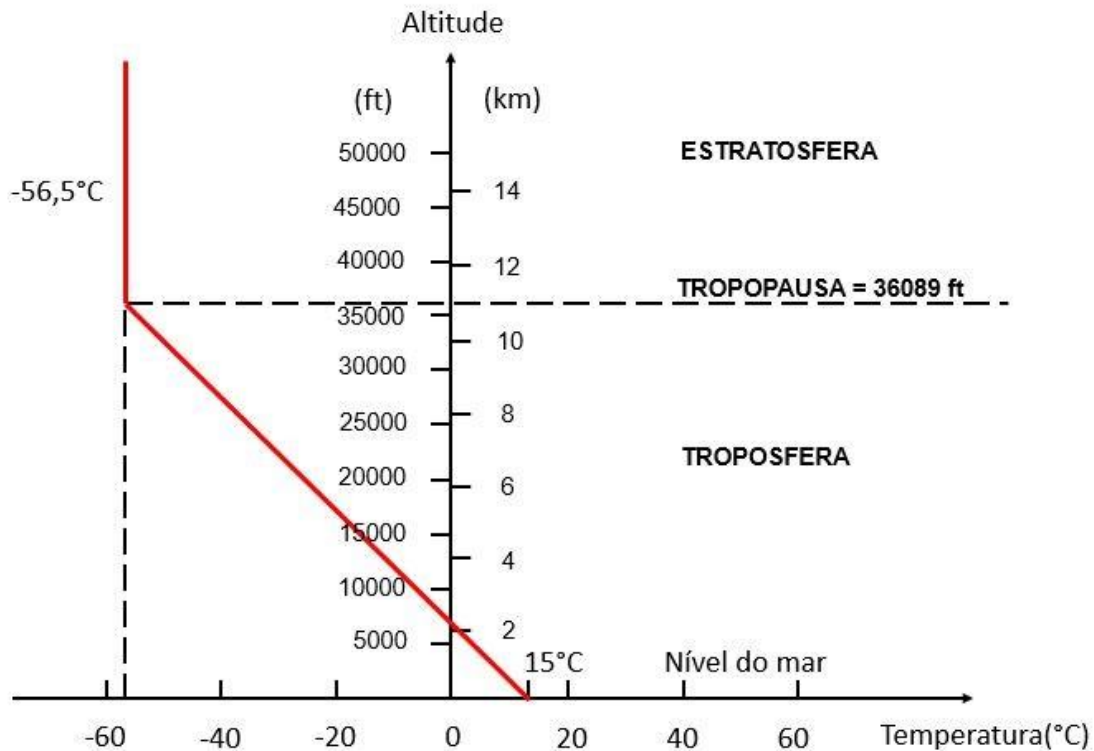


Figura 2. 2 – Variação da Temperatura na Atmosfera Padrão; Adaptada de [33]

A troposfera é a camada atmosférica que se estende desde a superfície da Terra. Inicia-se ao nível do mar e termina a 11 quilómetros de altitude, caracterizando-se por uma diminuição linear da temperatura do ar em função da altitude.

A temperatura na troposfera ($h \leq 11000 \text{ m}$) pode ser aproximada através da equação 2.3:

$$T(h \leq 11000 \text{ m}) = T_0 - \alpha \cdot h \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

T_0 – temperatura ao nível do mar ($= 288,15 \text{ K}$)

α – rácio de descida de temperatura na troposfera ($= 6,5 \times 10^{-3} \text{ K/m}$)

h – altitude [m]

A estratosfera inicia-se aos 11 quilómetros de altitude e a sua principal característica é a temperatura constante até aos 20 quilómetros.

A temperatura na estratosfera ($h \geq 11000 \text{ m}$) é igual a:

$$T(h \geq 11000 \text{ m}) = 216.65 \text{ K} = -56.5 \text{ °C} \quad \text{Equação 2.4}$$

Pressão

O diagrama da figura 2.3 ilustra a forma como evolui a pressão na atmosfera padrão. O conhecimento da distribuição desta grandeza na atmosfera é muito importante para a aeronáutica, visto que é com base na medição desta grandeza que muitos componentes aeronáuticos funcionam.

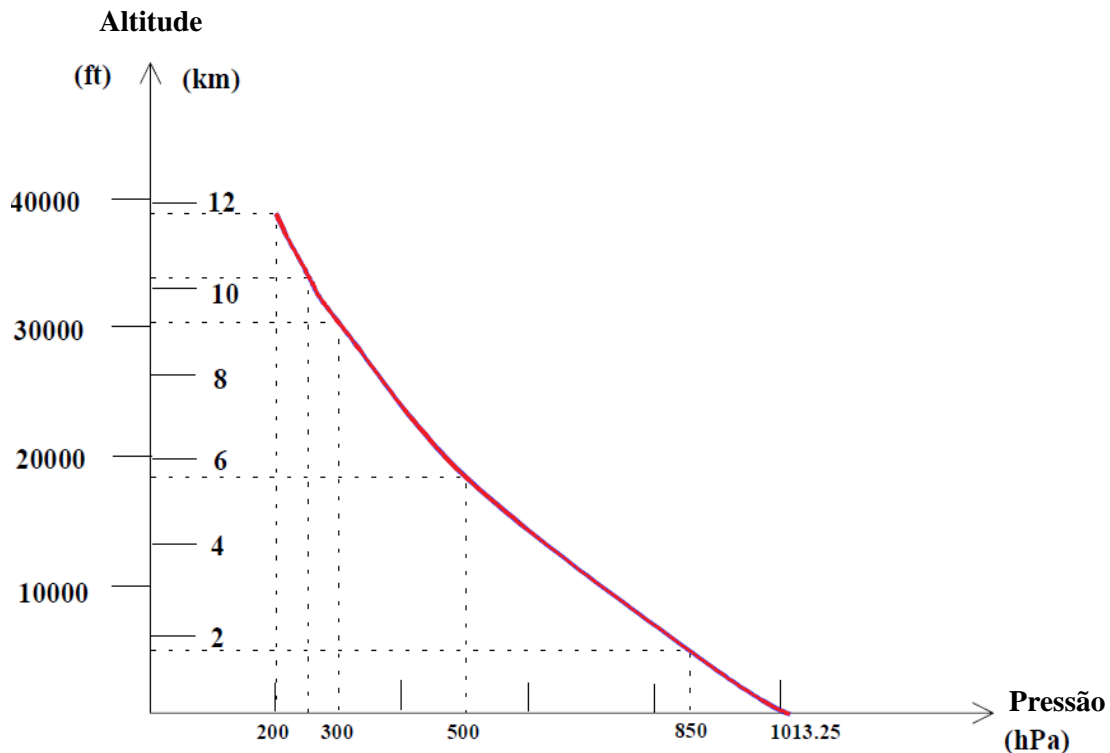


Figura 2. 3 – Variação da Pressão na Atmosfera Padrão ; Adaptada de [33]

A pressão na troposfera ($h \leq 11000 \text{ m}$) pode ser aproximada através da equação 2.5:

$$p(h \leq 11000 \text{ m}) = p_0 \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot h}{T_0}\right)^{\frac{g}{\alpha R}} \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde:

p_0 - pressão ao nível do mar (101325 Pa)

A pressão na estratosfera ($h \geq 11000 \text{ m}$) pode ser aproximada através da equação 2.6:

$$p(h \geq 11000 \text{ m}) = p_{11k} \cdot e^{\frac{-g}{R \cdot T_{11k}} \cdot (h - 11000)} \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde:

p_{11k} - pressão na tropopausa (22632 Pa)

T_{11k} - temperatura na tropopausa (216.65 K)

O documento da ISA distingue dois tipos de altitude, a altitude geométrica e a altitude geopotencial. A altitude geométrica trata-se da distância vertical verdadeira entre um ponto e uma origem de referência, neste caso o nível do mar. A altitude geopotencial trata-se de uma aproximação da altitude geométrica de acordo com uma camada de pressão, esta é a medida fornecida pelos altímetros mecânicos que são utilizados a bordo das aeronaves [4]. Estes estimam a altitude em função da pressão detetada no seu aneroide para qualquer circunstância de voo.

As equações 2.7 e 2.8 representam as equações de calibração de um altímetro para cada uma das camadas [4]:

- Troposfera ($p \geq 22632 \text{ Pa}$)

$$h(p \geq 22632 \text{ Pa}) = \frac{T_0}{\alpha} \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\alpha R}{g}} \right) \quad \text{Equação 2.7}$$

- Estratosfera ($p \leq 22632 \text{ Pa}$)

$$h(p \leq 22632 \text{ Pa}) = 11000 - \frac{R \cdot T_{11k}}{g} \cdot \ln \left(\frac{p}{p_{11}} \right) \quad \text{Equação 2.8}$$

Coeficiente de Viscosidade

A viscosidade do ar resulta principalmente da difusão molecular que transfere momento entre camadas do fluido.

O coeficiente de viscosidade pode ser calculado, de acordo com a ISA, a partir da fórmula de Sutherland, expressa pela equação 2.9:

$$\mu = \frac{\beta \cdot T^{3/2}}{T + S} \quad \text{Equação 2.9}$$

Onde:

μ – coeficiente de viscosidade

β – constante ($1.458 \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot (^\circ\text{K})^{-1/2}$)

S – constante de Sutherland para o ar ($104,4 \text{ }^\circ\text{K}$)

É importante referir que todas as equações apresentadas neste capítulo são válidas para as condições SI.

Na tabela 2.2 é apresentado um excerto da ISA na qual estão indicados os valores de pressão, temperatura, massa volúmica e coeficiente de viscosidade dividido em 6 patamares desde o nível do mar até aos cinquenta mil pés de altitude.

Tabela 2. 2 – Condições Atmosféricas em 6 Altitudes Distintas; Adaptada de [3]

| Altitude Geopotencial (ft) | Pressão (mb) | Temperatura (°C) | Massa volúmica ρ (kg/m ³) | Coefficiente de viscosidade μ (Pa.s) |
|----------------------------|--------------|------------------|--|--|
| 0 | 1013,25 | 15,000 | 1,225 | 1,789E-05 |
| 10000 (3084 m) | 696,82 | -4,812 | 0,905 | 1,692E-05 |
| 20000 (6096 m) | 465,63 | -24,624 | 0,653 | 1,591E-05 |
| 30000 (9144 m) | 300,90 | -44,436 | 0,458 | 1,487E-05 |
| 40000 (12192 m) | 187,54 | -56,5 | 0,302 | 1,422E-05 |
| 50000 (15240 m) | 115,97 | -56,5 | 0,186 | 1,422E-05 |

Desta forma é possível ter uma estimativa de quais as condições do ar a determinada altitude.

2.2 Fisiologia do Ser Humano em Altitude

O termo ar, frequentemente utilizado, refere-se à mistura de gases que constitui a nossa atmosfera. Este é composto essencialmente por 78 por cento de azoto e 21 por cento de oxigénio [5]. Os restantes 1 por cento são ocupados por vários gases em pequenas quantidades. Alguns destes gases, como o dióxido de carbono, vapor de água e ozono, são também eles indispensáveis à vida na terra. A figura 2.4 ilustra a distribuição percentual de gases na nossa atmosfera.

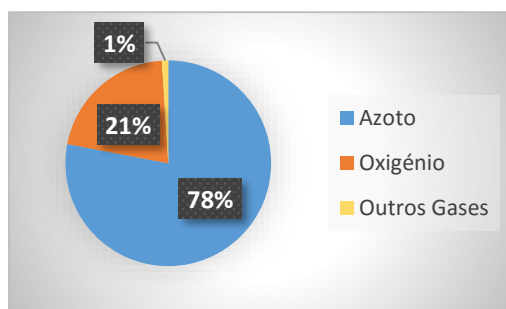


Figura 2. 4 – Distribuição Percentual de Gases na Atmosfera

À medida que nos afastamos da superfície terrestre, em direção ao espaço, a quantidade de moléculas de gases diminui rapidamente. No entanto, a proporção entre azoto e oxigénio mantêm-se constante até aos 80 quilómetros acima do nível do mar [5]. A proporção de dióxido de carbono é bastante estável, enquanto as quantidades de vapor de água e ozono variam substancialmente.

A segunda substância mais abundante na atmosfera, o oxigénio, desempenha um papel essencial à maioria dos processos de vida. A pressão exercida pelo oxigénio como componente do ar é denominada pressão parcial de oxigénio (PP_{O_2}) [6]. Esta ao nível do mar toma o valor aproximado de 20 quilopascal, sendo suficiente para oxigenar completamente o sangue de forma a permitir que o corpo e a mente funcionem normalmente.

Com o aumento de altitude torna-se progressivamente mais difícil para o ser humano respirar oxigénio, visto que a PP_{O_2} diminui em proporção direta com a pressão do ar. A grande altitude este fator leva à insuficiência de oxigenação do sangue, condição conhecida por hipoxia, e em casos extremos pode originar a morte.

A figura 2.5 demonstra como evolui a PPO_2 em função da altitude.

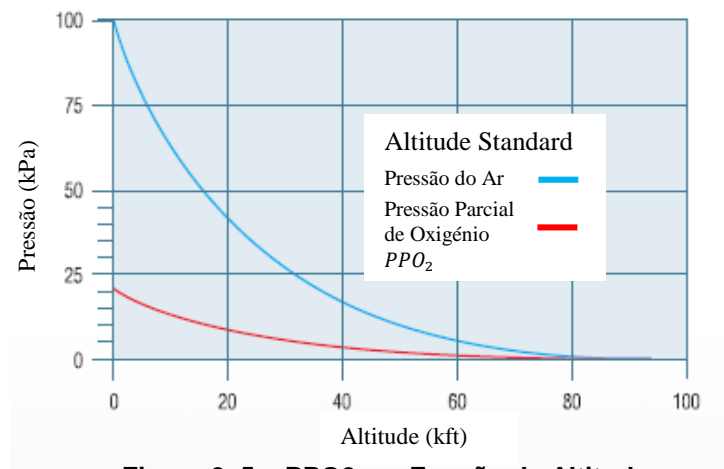


Figura 2. 5 – PPO_2 em Função da Altitude;
Adaptada de [6]

Até aos 7 mil pés acima do nível do mar (*mean sea level* – MSL), a PPO_2 é suficiente para saturar o sangue com oxigênio, no entanto a partir desta altitude a pressão parcial de oxigênio começa a tornar-se insuficiente [5]. Aos 10 mil pés MSL, a saturação do sangue com oxigênio é apenas 90 por cento do que deveria ser em condições normais. Períodos duradouros a esta altitude podem resultar em dores de cabeça e fadiga, ambos sintomas de hipoxia. Aos 15 mil pés MSL a saturação do sangue com oxigênio desce para 81 por cento. Os sintomas a estas condições são, normalmente, sono, dores de cabeça, lábios e unhas de cor azulada e aceleração da pulsação cardíaca e da respiração. Pior ainda, a visão e a capacidade de julgamento são afetadas, comprometendo a segurança da aeronave. Aos 25 mil pés MSL bastam 5 minutos para um ser humano perder os sentidos, visto que o sangue tem uma percentagem de saturação de oxigênio de apenas 50 por cento [5].

Os efeitos negativos da redução da pressão atmosférica em altitude de voo, i.e. a falta de oxigênio no sangue, podem ser ultrapassados de duas formas: aumentando a pressão de oxigênio ou aumentando a quantidade de oxigênio na mistura de ar.

Grandes aviões de transporte (*large transport-category*) e aviões de passageiros de alto desempenho (*high performance passenger aircraft*) pressurizam o ar na sua cabine [5]. Isto serve para forçar a percentagem normal de 21 por cento de oxigênio a ser absorvida pelo sangue.

Ao aumentar-se a quantidade de oxigênio disponível nos pulmões, menor é a pressão necessária para saturar o sangue. Esta é a função básica de um sistema de oxigênio de um avião. O aumento do nível de oxigênio acima dos 21 por cento encontrados na atmosfera pode compensar a redução da pressão devida ao aumento de altitude. A quantidade de oxigênio, presente no ar que é respirado, pode ser regulada de forma a manter uma quantidade suficiente para saturação arterial. A normal atividade física e mental pode ser mantida até à altitude de aproximadamente 40 mil pés (MSL) com uso exclusivo de oxigênio suplementar [5].

Sistemas de oxigênio deste tipo são mais comumente utilizados como sistemas primários em pequenas e médias aeronaves sem cabine pressurizada. Aeronaves pressurizadas utilizam sistemas de oxigênio como um meio redundante caso ocorra uma falha na pressurização de cabine. Equipamentos de oxigênio portátil também podem ser encontrados a bordo para fins de primeiros socorros [5].

2.3 Sistemas de Fornecimento de Oxigénio

O oxigénio a bordo pode ser armazenado de várias formas: Em estado gasoso (GOX), em estado líquido (LOX) ou até em estado sólido (na forma de clorato de sódio que quando queimado produz oxigénio gasoso). Ainda existem sistemas avançados que separam o oxigénio dos outros gases do ar, armazenando-o em pleno voo, estes são conhecidos por OBOGS (*Onboard Oxygen Generating Systems*) [5].

O *design* do sistema de fornecimento de oxigénio utilizado numa aeronave depende maioritariamente do tipo de aeronave, do seu modo de operação e do facto de ter ou não sistema de pressurização. Os sistemas são normalmente caracterizados pelo tipo de regulador utilizado na libertação de oxigénio: fluxo contínuo (*continuous-flow*) e fluxo de comando (*demand flow*). Algumas aeronaves utilizam apenas um sistema de fluxo contínuo de oxigénio para passageiros e tripulação. Os sistemas de pressão de comando são largamente utilizados como sistema da tripulação, especialmente em grandes aeronaves de transporte. Muitas aeronaves têm uma combinação dos dois sistemas podendo ainda ser completado com equipamento portátil [5].

Os sistemas de fluxo contínuo, como o próprio nome indica, fornecem sempre oxigénio a um fluxo contínuo. Estes permitem que o oxigénio saia da botija a alta pressão através de uma válvula para um regulador/redutor onde a pressão deste é reduzida e este é posteriormente alimentado continuamente, a pressão respirável, a um tubo acoplado à máscara do utilizador [5].

Nos sistemas de fluxo de comando o oxigénio segue um percurso semelhante ao existente nos sistemas de fluxo contínuo, mas neste caso em vez de o oxigénio ser alimentado continuamente este só é alimentado quando necessário, ou seja, quando o utilizador inspira. Podem distinguir-se dois tipos de sistemas de fluxo de comando em função do regulador de oxigénio que utilizam: sistema de diluição de comando e sistema de pressão de comando.

Os tipos de reguladores existentes e seu modo de funcionamento serão apresentados no subcapítulo 2.4.

A figura 2.6, adaptada do manual técnico de equipamentos de oxigénio existente na OGMA, ilustra o comportamento do ser humano a diferentes altitudes.

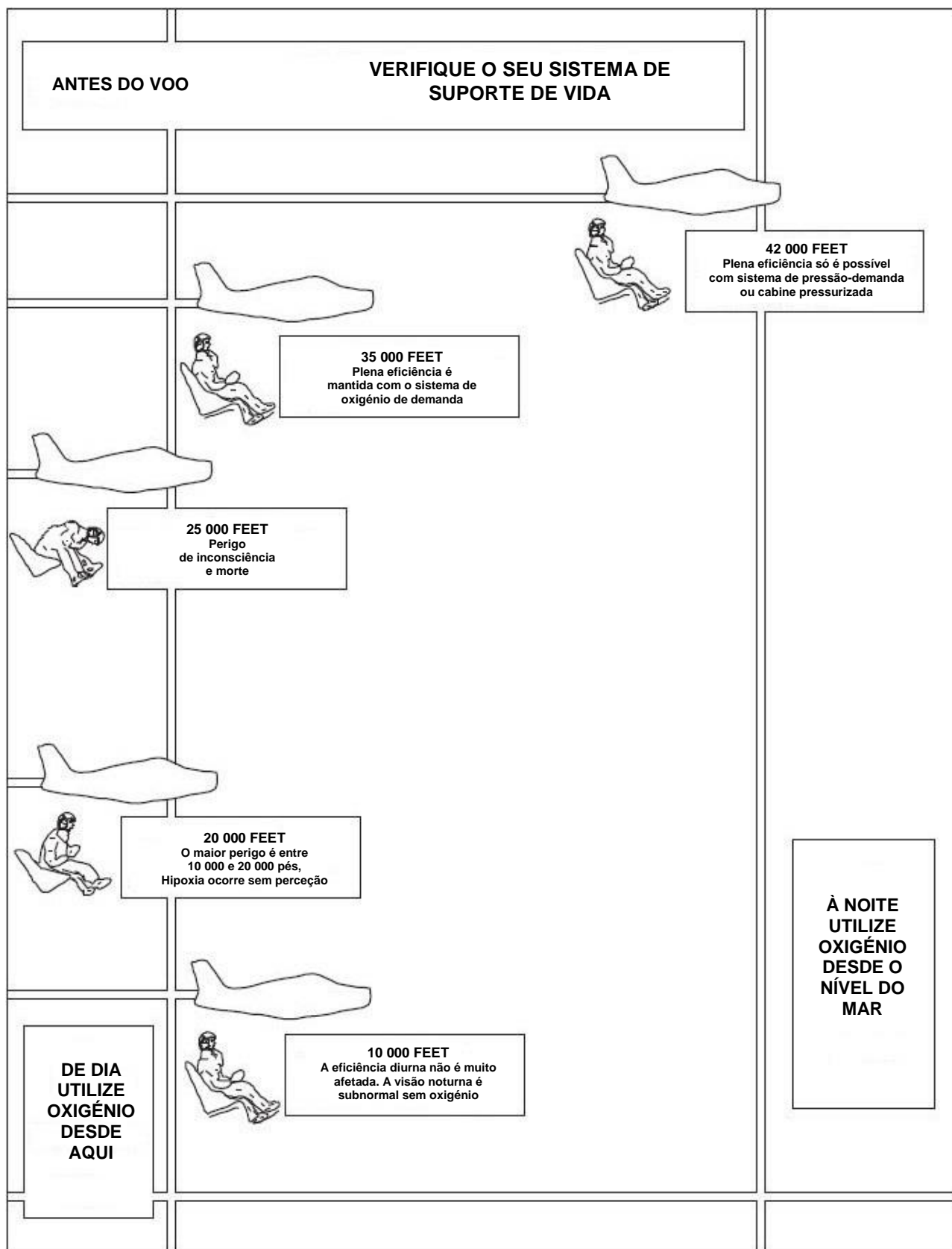


Figura 2. 6 – Eficiência do Ser Humano em Altitude; Adaptada de [7]

2.4 Reguladores de Oxigénio

Os reguladores de oxigénio (RO) são componentes do sistema de fornecimento de oxigénio de aeronaves e a sua composição pode apresentar diversas configurações consoante o tipo de sistema que integram.

Nos sistemas de fluxo contínuo estes apresentam uma configuração simples, sendo que a sua principal função é a redução da pressão do oxigénio vindo da botija para níveis respiráveis.

Nos sistemas de fluxo de comando estes encontram-se a jusante da válvula de redução de pressão, responsável pela redução de pressão de 1800 psi (pressão do cilindro de armazenamento de oxigénio, no caso de ser GOX) para 70-90 psi [6]. Cada utilizador tem o seu regulador individual. A configuração destes RO é um pouco mais complexa, podendo distinguir-se dois tipos de RO: RO de diluição de comando e RO de pressão de comando [5].

Os RO de diluição de comando aguentam o fluxo de oxigénio até que o utilizador inale através da máscara de comando. Este tipo de regulador dilui oxigénio puro com ar da cabine cada vez que o utilizador inspira [5]. A tecnologia envolvida nestes componentes é unicamente mecânica sendo composta por válvulas, restritores, aneroides e diafragmas [7].

Os RO de pressão de comando (figura 2.7) operam de forma semelhante aos RO de diluição de comando, na exceção de o oxigénio ser fornecido pelo regulador a alta pressão. Quando a válvula de comando está aberta, o oxigénio sobre pressão é forçado para o interior dos pulmões assegurando desta forma a saturação do sangue com oxigénio independentemente da altitude geopotencial da cabine. Reguladores deste tipo são utilizados em aeronaves que regularmente voam a 40 mil pés MSL e acima, embora tenham também a função de diluição que ocorre abaixo dos 34 mil pés MSL [5].

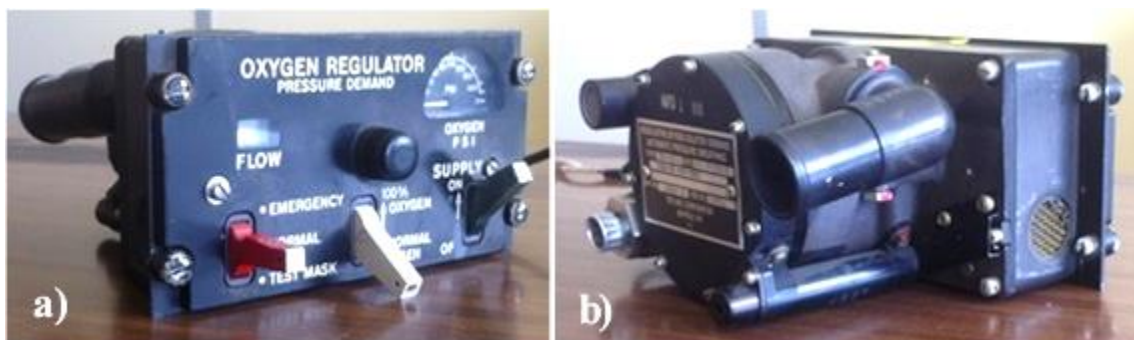


Figura 2. 7 – Regulador de Oxigénio de Pressão de Comando: a) Vista Anterior; b) Vista Posterior

A manutenção de RO é um dos serviços prestados pela OGMA. Sendo que a grande maioria dos reguladores que faz manutenção na empresa são RO de pressão de comando e visto que o seu modo de operação é o mais completo de todos os tipos de RO, o funcionamento deste tipo de regulador é explicado detalhadamente em seguida:

Um RO de pressão de comando é constituído por 3 alavancas/botões como ilustrado na figura 2.8.

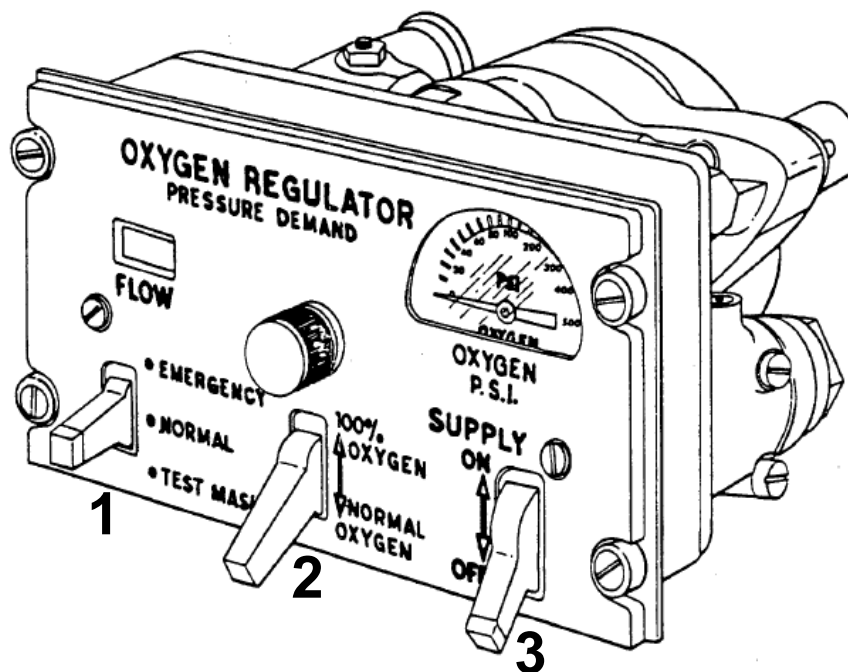


Figura 2. 8 – Painel de um RO de Pressão de Comando; Adaptada de [7]

- 1 – Alavanca de controlo de pressão de emergência
- 2 – Alavanca de controlo de diluição manual
- 3 – Alavanca de abastecimento de entrada

Consoante a combinação da posição das alavancas (1,2,3) o regulador pode ter vários modos de funcionamento (ver figura 2.9).

Modo (NORMAL; NORMAL OXYGEN; ON)

O ar é fornecido ao piloto de modo normal:

O nível de abertura da válvula de comando é tanto maior quanto maior for a depressão detetada no diafragma, consequência da inspiração do utilizador.

A mistura ar-oxigénio é controlada pelo aneroide e pelo diafragma, sendo a quantidade de entrada de ar exterior inversamente proporcional à altitude de funcionamento.

Quanto maior a altitude de voo, mais expande o aneroide, sendo menor a área de passagem de ar exterior permitida pela alavanca de controlo de entrada de ar. Nestas condições a inspiração do utilizador provoca uma maior depressão no interior da câmara provocando uma maior abertura da válvula de comando, sendo maior a proporção de oxigénio que inala.

Aos 34 mil pés MSL o aneroide está completamente expandido e consequentemente não é permitida a entrada de ar exterior no regulador.

Modo (NORMAL; 100% OXYGEN; ON)

Ao colocar-se a alavanca 2 na posição “100% OXYGEN” a válvula de ar exterior é forçada ao fecho. Desta forma a entrada de ar exterior é totalmente obstruída, sendo o utilizador apenas alimentado a oxigénio puro.

Modo (EMERGENCY/ TEST MASK; NORMAL OXYGEN; ON)

Neste modo a válvula de comando é forçada a manter-se aberta, sendo fornecida mistura, a pressão positiva, para a máscara. Desta forma, a mistura é forçada para o interior dos pulmões do utilizador. O diafragma deixa de fazer a sua função. A pressão induzida é de 2 a 4 polegadas de água na posição “EMERGENCY” e 6 a 16 polegadas de água na posição “TEST MASK”.

Modo (OFF)

O oxigénio não é admitido ao interior do regulador, estando o piloto a respirar apenas ar exterior qualquer que seja a circunstância de voo.

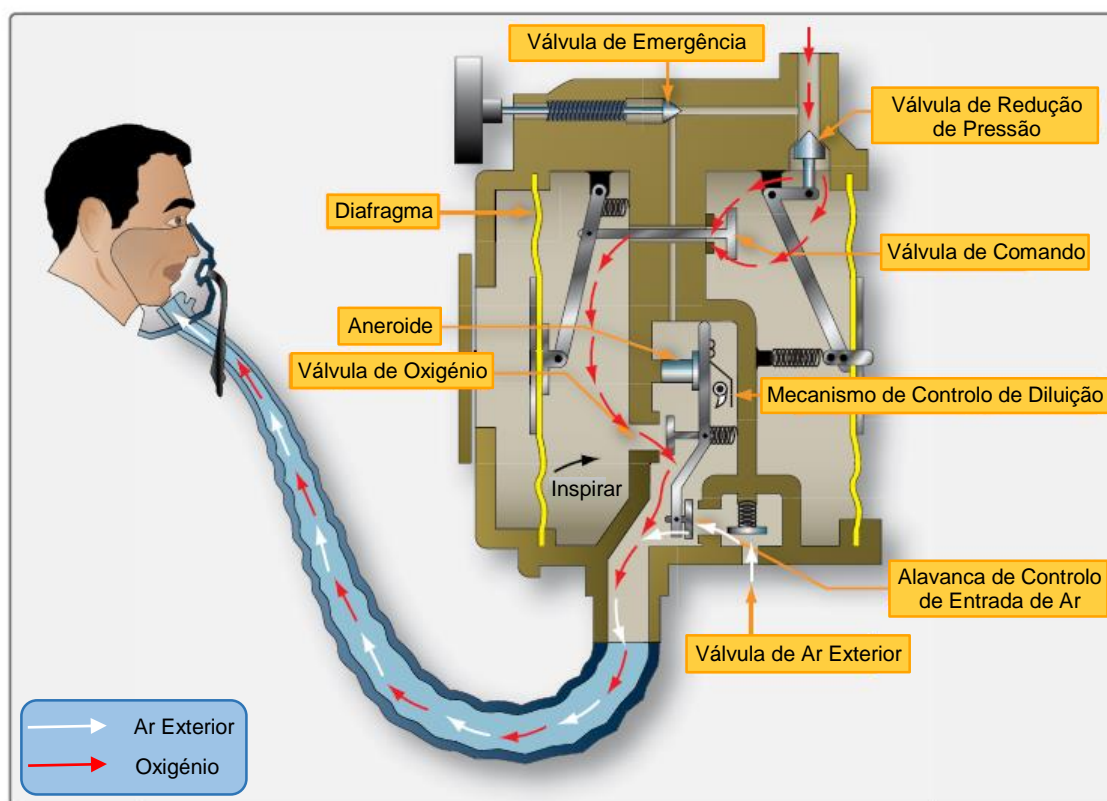


Figura 2. 9 – Esquema Funcional de um RO de Pressão de Comando; Adaptada de [5]

No modo “Normal” o regulador só fornece fluxo quando este é forçado (ou seja, quando o utilizador inala) este permite a entrada de ar exterior que vai ser misturado com o fluxo de oxigénio. Isto diminui a quantidade de oxigénio que necessita de ser fornecido, para que a botija de oxigénio dure mais tempo. Esta característica do regulador é útil porque o modo de oxigénio puro não é exigido abaixo dos 34 mil pés (aproximadamente) e desta forma é possível uma melhor gestão do oxigénio [5].

A máscara tem uma válvula que controla a entrada de ar no ciclo de inalação e outra que controla a saída de ar para o exterior no ciclo de expiração. Estas válvulas são na prática diafragmas que se movem ao longo de um eixo e abrem e fecham consoante o diferencial de pressão a que são sujeitas [7].

3. Medição de Caudal

3.1 Introdução ao Conceito de Caudal

Antes de entrar no tema dos caudalímetros é necessário entender-se o conceito de caudal.

O conceito de fluxo está presente em inúmeras aplicações da engenharia. O caudal (ou fluxo) pode ser entendido como a quantidade de líquido ou gás que atravessa uma superfície numa unidade de tempo. A quantidade de caudal pode ser expressa em volume ou massa por unidade de tempo [8].

O caudal volúmico é dado pelo volume de um fluido que atravessa uma superfície numa unidade de tempo. A equação 3.1 descreve isso mesmo:

$$Q = \frac{v}{t} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

Q – caudal volúmico [m^3/s]
 v – volume [m^3]
 t – tempo [s]

Supondo uma superfície S , representada na figura 3.1a, através da qual passa um fluido sem resistência. Qual o volume de fluido que atravessa S numa unidade de tempo? A área elementar dA representa um infinitésimo da superfície S . O volume do paralelepípedo representado na figura 3.1b corresponde à quantidade de fluido deslocada através de dA durante o tempo dt [8].

Este é dado pela equação 3.2:

$$dv = V dt dA \cos(\theta) = (V \cdot \hat{n}) dA dt \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

dv – infinitésimo de volume
 V – intensidade do vetor velocidade do fluido
 dt – infinitésimo de tempo
 dA – infinitésimo de área
 \hat{n} – vetor unitário normal a dA
 θ – ângulo entre os vetores \hat{n} e V

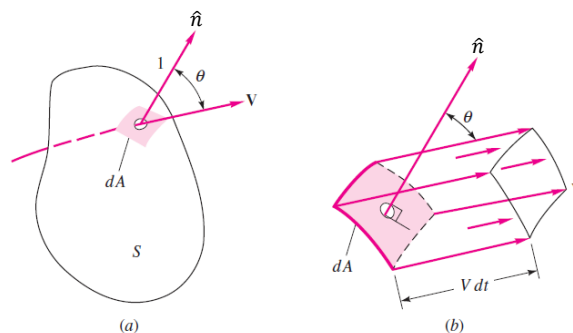


Figura 3. 1 – Caudal Volumétrico do Escoamento Através de uma Superfície Arbitrária: (a) Área Elementar dA Sobre a Superfície; (b) Volume Incremental de Fluido Deslocado Através de dA [8]

O integral dv/dt , representado na equação 3.3, é o caudal volumétrico total Q através da superfície S

$$Q = \int_S (V \cdot \hat{n}) dA = \int_S V_n dA \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

V_n – componente da velocidade normal à superfície dA

O caudal volúmico pode ser multiplicado pela massa volúmica do fluido, obtendo-se o caudal mássico \dot{m} (equação 3.4). Caso a massa volúmica varie ao longo da superfície, esta deve fazer parte do integral.

$$\dot{m} = \int_S \rho(V \cdot \hat{n}) dA = \int_S \rho V_n dA \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

\dot{m} – caudal mássico $[kg/s]$

No caso de a massa volúmica e a velocidade serem constantes ao longo da superfície S , a equação 3.4 pode ser simplificada, dando origem à equação 3.5:

$$\dot{m} = \rho Q = \rho AV \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

A – área da secção

3.2 Tipos de Medidores de Caudal

Caudalímetros são dispositivos destinados à medição de caudal ou fluxo de um determinado fluido. Estes são muito utilizados em diversos processos industriais, para medir as mais variadas gamas de fluxos sob diferentes condições de pressão e temperatura, podendo ter muitas exigências distintas em matéria de custo, precisão, segurança, perdas de pressão, compatibilidade de materiais, entre outros. Uma ampla gama de diferentes tipos de medidores de fluxo foi desenvolvida para satisfazer os requisitos em todos os casos, independentemente destas variações nas propriedades de fluido e circunstâncias [9].

Os caudalímetros existentes no mercado mundial podem ser agrupados em quatro grupos distintos, como apresentado na figura 3.2 [10].

| Caudalímetros de Pressão Diferencial | Caudalímetros Mecânicos | Caudalímetros Eletrónicos | Caudalímetros Mássicos |
|--|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Placa de Orifício • Tubo de Venturi • Bocal ou Nozzle • Tubo de Pitot • <u>Fluxo Laminar</u> | <ul style="list-style-type: none"> • Deslocamento Positivo • Turbina | <ul style="list-style-type: none"> • Magnéticos • Vortex • Ultrasónicos • Lazer | <ul style="list-style-type: none"> • Coriolis • <u>Dissipação Térmica</u> |

Figura 3. 2 – Classificação de Caudalímetros

Neste capítulo apenas serão abordados dois casos concretos de caudalímetros: os caudalímetros de fluxo laminar e os caudalímetros mássicos de dissipação térmica, isto porque apenas o seu conhecimento é relevante para este estudo.

Caudalímetros de Fluxo Laminar

Caudalímetros de fluxo laminar (CFL) são um tipo de medidores de fluxo de pressão diferencial muito utilizado para medir baixos caudais de gases e líquidos [11].

Um caudalímetro de fluxo laminar é composto por um elemento de fluxo laminar (EFL) e um instrumento de medição de pressão diferencial. O elemento de fluxo laminar pode apresentar várias formas, a mais comum é na forma de tubos capilares (figura 3.3) [9].

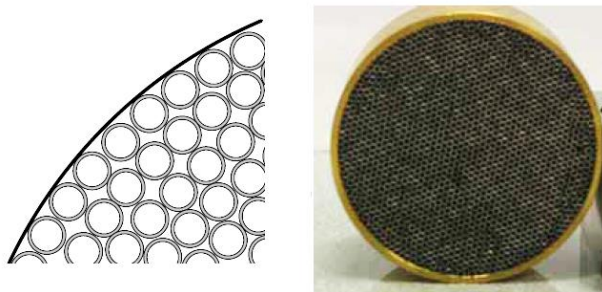


Figura 3. 3 – Elemento de Fluxo Laminar [34]

O elemento de fluxo laminar garante que o fluxo passante está em condição laminar, ou seja não permite a existência de turbulência. Nestas condições as forças viscosas, geradas por fricções internas do fluido, superam as forças inerciais do fluido e desta forma o mecanismo dominante de resistência ao movimento do fluido é a fricção entre as paredes e o fluido [12].

O parâmetro que caracteriza este tipo de fluxo é o número de Reynolds cujo resultado é o quociente entre forças inerciais e forças viscosas. Para um fluido de massa volúmica ρ e viscosidade μ escoando ao longo de uma tubagem de área transversal constante A com caudal volúmico Q , o número de Reynolds pode ser dado pela equação 3.6:

$$Re = \frac{\rho Q D}{\mu A} = \frac{4 \rho Q}{\mu \pi D} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

Re – número de Reynolds

D – diâmetro interno da tubagem

Em condições de funcionamento normal onde o número de Reynolds é menor que 2300, o fluxo permanece em condição laminar.

A queda de pressão Δp devida à fricção do fluido entre dois pontos separados à distância Δx ao longo de um ducto em regime laminar é quantificável, e pode ser expressa pela equação de Hagen-Poiseuille (equação 3.7) (ver figura 3.4):

$$\Delta p = \frac{128\mu Q \Delta x}{\pi D^4}$$

Equação 3.7

Onde:

Δx – distância entre duas tomadas de pressão

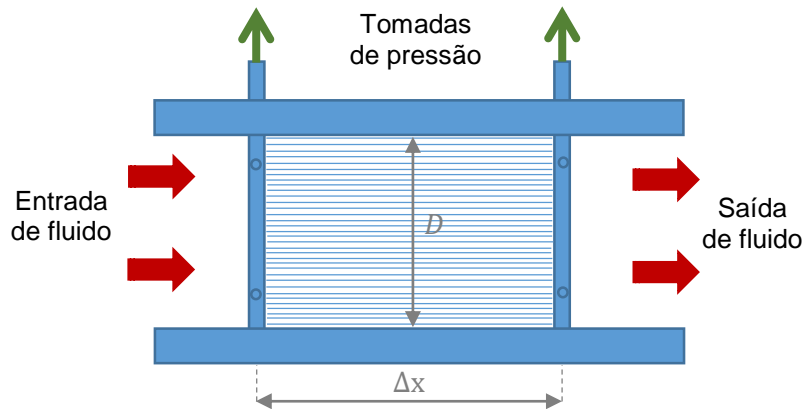


Figura 3. 4 – Corte Longitudinal de um Caudalímetro de Fluxo Laminar

Esta equação demonstra que num escoamento laminar de um fluido, existe uma relação linear entre o caudal volumétrico de passagem e a queda de pressão associada.

Uma consideração deste tipo de caudalímetros é a sua dependência da viscosidade do fluido, que por sua vez depende da temperatura. Este fator deve ser tido em conta caso se pretenda alcançar boa precisão na medição [11].

Ao aplicar-se a equação de Hagen-Poiseuille são assumidas as seguintes condições [13]:

1. O fluxo tem energia cinética desprezável
2. O fluxo é laminar e estável
3. Os capilares são retos e têm secção transversal circular uniforme
4. O fluido é incompressível
5. O fluido é newtoniano
6. A temperatura do fluido é constante
7. Não há escorregamento nas paredes dos capilares

Em situações reais é natural que algumas destas condições possam não ser cumpridas e por essa razão surjam erros na medição de caudal. Como alternativa a este modelo simplista existem modelos práticos que permitem corrigir os erros provenientes do não cumprimento das condições enumeradas. Um desses modelos práticos será abordado mais adiante e inclusive adotado neste trabalho.

Caudalímetros Mássicos de Dissipação Térmica

Os Caudalímetros Mássicos de Dissipação Térmica (CMDT) são instrumentos de precisão concebidos para efetuar medições diretas de caudais mássicos. Ao contrário das medições de caudal volumétrico que são afetadas pelas condições do ambiente e do processo, as medições de caudal mássico não são afetadas por variações de viscosidade, densidade, temperatura ou pressão [10].

Os CMDT têm por base o conceito de condutividade térmica. Estes são regularmente utilizados para medir baixos caudais e podem ser divididos em duas categorias [9]:

1. Caudalímetros de transferência de calor - que medem a variação de temperatura do fluido após uma quantidade de calor conhecida ter sido adicionada ao fluido
2. Caudalímetros de sonda aquecida - que medem a energia necessária para manter uma sonda imersa no fluido a temperatura constante

Caudalímetros de Transferência de Calor

Os componentes básicos de um caudalímetro de transferência de calor são normalmente dois sensores de temperatura e um aquecedor na forma de resistência elétrica. O aquecedor e os sensores podem estar em contacto com a corrente do fluido (figura 3.5 a) ou estar na parte exterior do tubo (figura 3.5 b) [9].

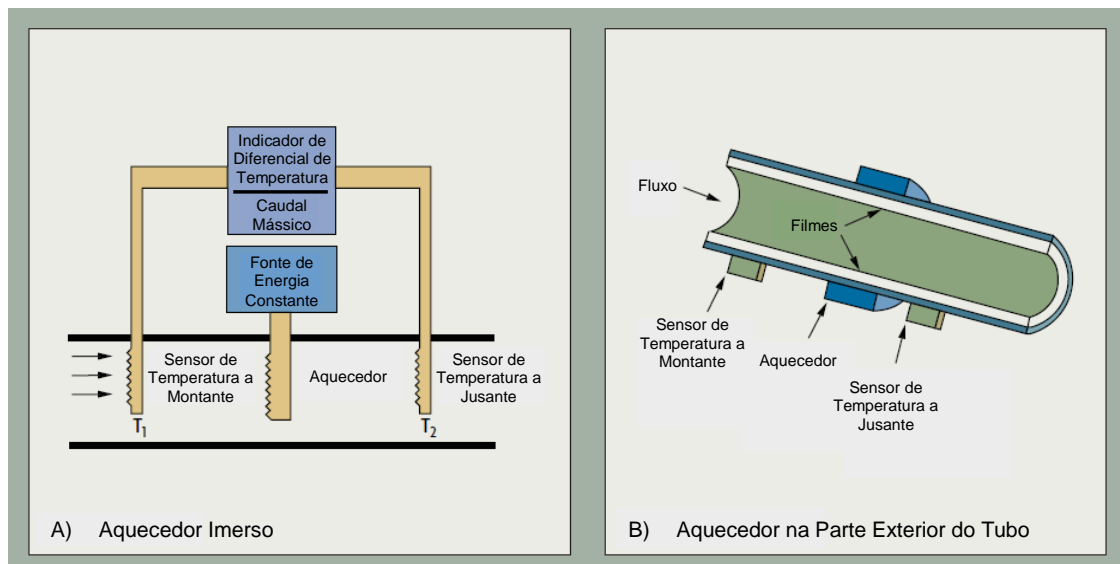


Figura 3. 5 – Caudalímetro de Transferência de Calor: a) Aquecedor Imerso; b) Aquecedor na Parte Exterior do Tubo; Adaptada de [10]

O facto de os componentes não estarem em contacto com o fluido é uma mais valia, sendo que não são danificados por fatores como a corrosão e erosão.

Nos caudalímetros de transferência de calor é fornecida ao fluido, através do aquecedor elétrico, uma quantidade fixa de calor. Enquanto o fluido atravessa a tubagem os termómetros medem o aumento da sua temperatura. A diferença de

temperatura entre os dois termómetros é tanto maior quanto maior for o caudal mássico de passagem [9].

A relação entre o caudal mássico de passagem e a diferença de temperatura entre os dois sensores depende da condutividade do fluido e de fatores do próprio caudalímetro [9].

Caudalímetros de Sonda Aquecida

Caudalímetros de sonda aquecida apresentam na linha de fluxo dois sensores de temperatura que estão em contacto com o escoamento a medir. Um dos sensores é aquecido por intermédio de um circuito integrado, funcionando como o sensor de fluxo (SF), enquanto o segundo sensor determina a temperatura do gás, atuando como o sensor de referência (SR) (ver figura 3.6) [9].

O circuito é equipado com um controlador que mantém constante a diferença de temperatura entre os dois sensores. As moléculas de gás ao passar pelo sensor de fluxo retiram-lhe energia, em forma de calor, obrigando o circuito a fornecer mais energia. A potência elétrica necessária para manter a diferença de temperatura entre os dois sensores determina o caudal mássico de passagem [9].

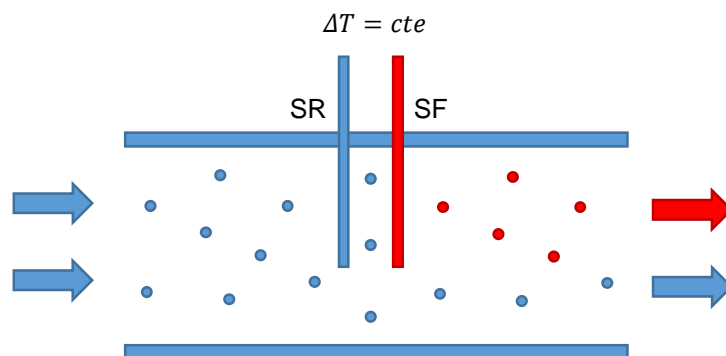


Figura 3. 6 – Caudalímetro de Sonda Aquecida

3.3 Caudal Volumétrico *Standard*

Como já foi visto, a medição de caudal pode ser efetuada de forma a obter-se dois tipos de caudal:

- Caudal Volúmico ou Volumétrico Q
ou
- Caudal Mássico \dot{m}

Isto depende do tipo de medidor de caudal que se utiliza. Caudalímetros mássicos medem o caudal mássico, todos os outros tipos medem o caudal volumétrico (figura 3.2).

Uma das dificuldades na medição de caudal volumétrico está no facto de esta grandeza ter dependência direta de um conjunto de variáveis, entre elas, temperatura, pressão, massa volúmica, coeficiente de viscosidade, humidade relativa, entre outras.

Quando se mede um valor de caudal volumétrico deve-se ter em conta os valores de pressão e temperatura do fluido no momento da medição. Caso a temperatura, no local de medição, for maior do que o valor esperado, as partículas de gás estão mais afastadas, deslocando-se, para um mesmo volume, menor quantidade de partículas de gás. Por esta razão foi necessário definir-se normas, no sentido de haver coerência na medição e inclusive na calibração de equipamentos de medição de caudal.

Suponhamos uma situação na qual temos duas medições de caudal nas quais a temperatura e pressão variam da primeira para a segunda medição, $T_1 \neq T_2$ e $p_1 \neq p_2$. A figura 3.7 representa a situação descrita [14]:

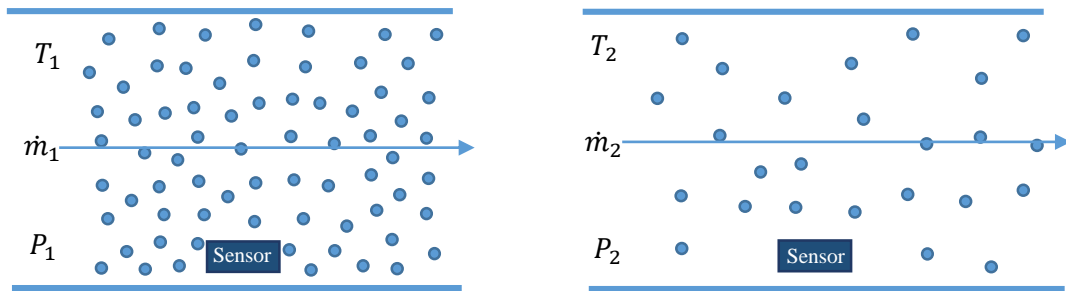


Figura 3. 7 – Caudal Volumétrico *Standard*; Adaptada de [14]

Sendo que o caudal mássico se mantém constante da primeira para a segunda medição (princípio de conservação de massa).

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad \text{Equação 3.8}$$

Assumindo a condição de gás ideal (equação 2.1) a equação 3.5 na qual se obtém o caudal mássico a partir do caudal volumétrico toma a forma da equação 3.9:

$$\dot{m} = \frac{p}{RT} \cdot Q \quad \text{Equação 3.9}$$

Sendo assim o balanço de massa toma a forma da equação 3.10:

$$\frac{p_1}{R_1 T_1} \cdot Q_1 = \frac{p_2}{R_2 T_2} \cdot Q_2 \quad \text{Equação 3.10}$$

Assumindo o mesmo gás em 1 e em 2 ($R_1 = R_2 = R$) a equação anterior toma a seguinte forma:

$$Q_2 = \frac{T_2 \cdot p_1}{p_2 \cdot T_1} \cdot Q_1 \quad \text{Equação 3.11}$$

Para haver coerência na medição de caudal devem definir-se as condições de pressão e temperatura de referência, face às quais o caudal deve ser corrigido.

Na indústria, quando se utilizam caudalímetros mássicos é comum apresentar o caudal mássico na forma de caudal volumétrico *standard*. O caudal volumétrico *standard* é o caudal volumétrico, de um fluido, corrigido em função de condições de pressão e temperatura padrão. As condições padrão ou *standard* de pressão e temperatura podem assumir diferentes valores, dependendo das normas que seguem. Na União Europeia, a pressão e a temperatura *standard* assumem os valores estabelecidos pela ISA ao nível do mar.

$$\text{Pressão Standard} \rightarrow p_{std} = p_0 = 101325 \text{ Pa}$$

$$\text{Temperatura Standard} \rightarrow T_{std} = T_0 = 288,15 \text{ K (15,0}^\circ\text{C)}$$

Fixando estas condições é possível definir o caudal *standard* Q_{std} que é corrigido face às variações de pressão e temperatura do fluxo relativamente às condições *standard*. Este pode ser obtido através da equação 3.12:

$$Q_{std} = \frac{T_{std} \cdot p_a}{p_{std} \cdot T_a} \cdot Q_a \quad \text{Equação 3.12}$$

Onde:

Q_{std} – caudal volumétrico *standard*

p_{std} – pressão *standard*

T_{std} – temperatura *standard*

p_a – pressão atual

T_a – temperatura atual

Q_a – caudal volumétrico atual

A unidade SI de caudal volumétrico *standard* é litros *standard* por minuto [*ls/min*].

A equação 3.12 surge da necessidade de coerência na medição de caudal volumétrico. Caso se opte por trabalhar com caudalímetros mássicos, esta equação pode ser utilizada de forma inversa para se obter o caudal atual em função do caudal *standard* obtido.

4. Processo Inicial de Medição de Caudal na Empresa

4.1 OGMA – Indústria Aeronáutica da Portugal, S.A.



Figura 4. 1 – Logotipo da Empresa

A OGMA, Indústria Aeronáutica de Portugal, S.A., sediada em Alverca e fundada em 1918, é uma empresa portuguesa dedicada à fabricação e manutenção de aeronaves.

Esta empresa emprega um total de 1600 pessoas ocupando uma área de 40 hectares, dos quais 139 000 metros quadrados são área coberta, hangares e pavilhões diversos. Possui ainda uma pista de descolagem/aterragem de 3 quilómetros de comprimento.

A OGMA possui um vasto leque de clientes nacionais e internacionais, tanto civis como militares e está certificada como centro de serviço autorizado por algumas das mais importantes entidades aeronáuticas.

A Força Aérea Portuguesa é um dos principais clientes portugueses da OGMA, sendo que a maior parte da sua frota faz manutenção nesta empresa.

Entre os seus serviços, destaca-se a manutenção dos aviões militares C-130, P-3, C-295 e F-16, das aeronaves comerciais Embraer ERJ135, 140 e 145, do Embraer Legacy e Embraer Lineage 1000, do Embraer 170 e Embraer 190, da família A320, assim como dos motores Rolls-Royce AE2100, AE3007 e T-56.

A OGMA divide-se em duas unidades de negócio: A unidade de Serviços MRO (*Maintenance, Repair and Operating*) que é responsável pela manutenção e reparo de aviões e seus sistemas e a unidade de Aeroestruturas que se dedica à criação, implementação e desenvolvimento de estruturas para aeronaves.



Figura 4. 2 – Vista Aérea da Empresa

Estas duas unidades são compostas por diversas áreas, como apresentado no organograma da figura 4.3 [15].

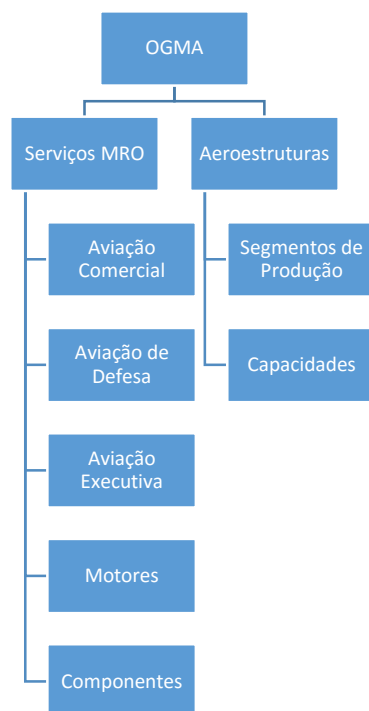


Figura 4. 3 – Organograma da OGMA

A OGMA - MCO (Manutenção de Componentes), área onde foi desenvolvido o presente trabalho, é responsável pela manutenção e reparo de componentes que compõem os sistemas de aeronaves. Este processo vai desde a receção do componente até à sua expedição. O sector divide-se em 6 subsectores especializados, como apresentado na figura 4.4.

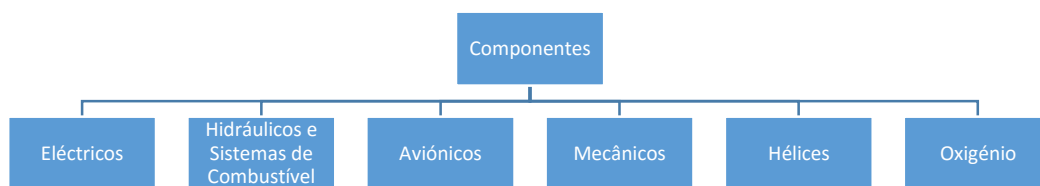


Figura 4. 4 – Organograma dos Componentes

Da OGMA MCO faz parte uma equipa de técnicos que é responsável por executar testes e reparações aos componentes, em fase de manutenção, e uma equipa de engenheiros que coordena todos os processos.

Os testes efetuados aos componentes são feitos por intermédio de Bancos de Ensaio (BE). Estes são equipamentos de bancada que têm como função testar componentes de sistemas aeronáuticos às suas condições de trabalho. Nos BE é, portanto, criado um ambiente virtual que simula as condições a que o componente está sujeito durante o voo. Desta forma assegura-se que o componente está a funcionar corretamente e não tem qualquer tipo de anomalias.

No subsetor do oxigénio existe um BE cuja função é o teste de RO, componente do sistema de fornecimento de oxigénio. Este BE revelou problemas que estiveram na origem deste estudo. O seu funcionamento será abordado no subcapítulo 4.2.

4.2 O Banco de Ensaio de Reguladores de Oxigénio

Nas instalações do setor de Oxigénio da OGMA - MCO, existe um Banco de Ensaio (BE) utilizado para regulação e realização de provas de certificação funcional de RO. Este BE é constituído por uma câmara barométrica na qual se pode reduzir a pressão de forma a simular condições em altitude. O regulador é colocado no interior desta câmara (ver figura 4.5), que pode ser fechada de forma a assegurar a pressão no seu interior, monitorizada por um altímetro de precisão.



Figura 4. 5 – Câmara Barométrica

O BE é equipado com CFL. Estes são compostos pelo próprio sensor e por um manómetro de coluna de líquido, que lhe está associado, e são responsáveis pela medição de fluxos de interesse para o teste dos reguladores. Este BE é ainda equipado com uma bomba de vácuo, um altímetro de precisão e uma botija de azoto. O seu diagrama funcional simplificado é apresentado na figura 4.6.

A bomba de vácuo, quando ligada, provoca a sucção do gás existente no interior da câmara para o exterior, provocando fluxos nas linhas 2 e 4, ver figura 4.6. Todos os fluxos são regulados por válvulas de globo de controlo manual.

As válvulas V2 e V3 podem ser reguladas para retirar ou colocar ar dentro da câmara e desta forma aumentar ou diminuir a pressão no seu interior. A altitude indicada no altímetro de precisão é inversamente proporcional à pressão no interior da câmara. Uma forma de estabilizar a altitude no interior da câmara, durante um ensaio, é aplicando o princípio de conservação de massa, colocando no interior da câmara a mesma quantidade de ar que desta é retirada.

O fluxo de maior interesse é o 4, visto que representa o *output* do regulador de oxigénio. Na prática trata-se do caudal inspirado pelo utilizador do RO.

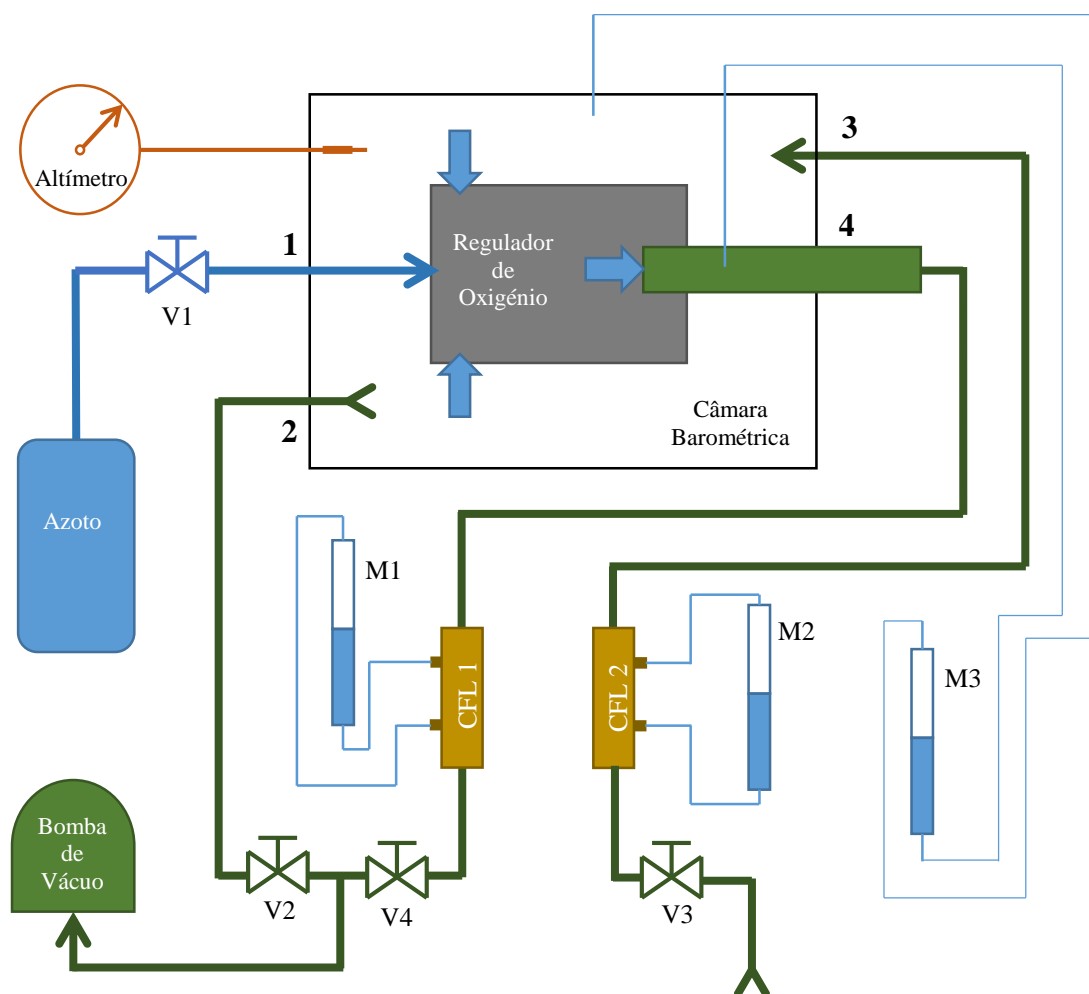


Figura 4. 6 – Diagrama Funcional do BE de RO

O diagrama funcional do BE de RO apresentado na figura 4.6 trata-se de uma simplificação do sistema pneumático existente no BE. Nesta simplificação estão omissas outras linhas de fluxo que são menos relevantes para o caso em estudo, mas que são também utilizadas para efetuar testes ao RO. Como objetivo de redução de custos, é utilizado azoto em vez de oxigénio na realização de testes.

Um regulador de oxigénio quando é recebido pela OGMA MCO segue um extenso protocolo de testes funcionais entre eles: teste às fugas, teste às válvulas, teste à pressão de segurança e à pressão de respiração, teste ao rácio de oxigénio, entre outros. A maioria destes testes utiliza os dois CFL e o esquema simplificado apresentado na figura 4.6. A estes caudalímetros é lhes imposta uma precisão mínima de leitura bastante apertada, visto que estes têm um papel fundamental na garantia do bom funcionamento dos RO.

4.3 Análise Crítica do Procedimento de Ensaio Inicial

No período inicial deste estágio, o BE de RO não se encontrava a operar (ver figura 4.7). Esta condição devia-se ao facto dos seus CFL originais (figura 4.8) se encontrarem fora de serviço devido a roturas nos seus ELF. Isto obrigara a que houvesse uma interrupção da manutenção de RO, podendo colocar em risco alguns dos contratos com os principais clientes da OGMA no serviço de manutenção de RO.

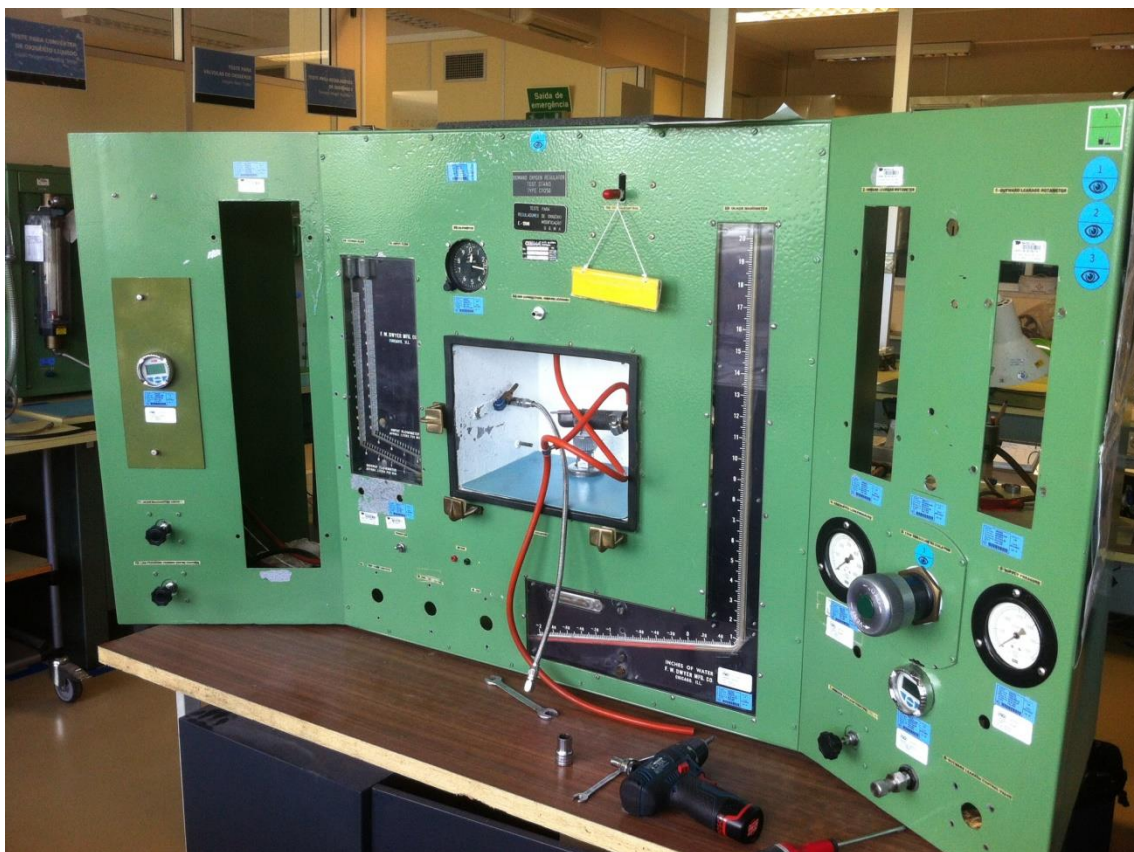


Figura 4. 7 – Banco de Ensaio em Fase de Modificações

Uma primeira tentativa de colocar novamente a produção em curso consistiu na substituição dos caudalímetros originais danificados por outros, em boas condições, provenientes de um BE em estado obsoleto (figura 4.10), mantendo a coluna de líquido original (instrumento de medição de pressão diferencial). Embora estes caudalímetros tivessem o mesmo princípio de funcionamento que os originais, a coluna de líquido indicadora (figura 4.9) estava graduada, em litros por minuto, de acordo com os caudalímetros avariados. A modificação dos caudalímetros desprezando esse facto,

veio introduzir erros de leitura. Isto porque as diferenças dimensionais entre os CFL originais e os adaptados levavam a que a relação $Q - \Delta P$ variasse de um caso para o outro.



**Figura 4. 8 – CFLs
Originais do BE**



**Figura 4. 10 – CFLs
Adaptados no BE**



**Figura 4. 9 – Coluna de
Líquido Indicadora
Graduada em Litros por
Minuto**

O manual técnico do BE de RO estipula que os seus caudalímetros não devem apresentar precisão superior a 1% fs (*full scale*). Desta forma, os erros de medição introduzidos por esta substituição de caudalímetros acabam por ser suficientes para que esta solução seja rejeitada por incumprimento da condição de precisão estipulada pelo manual.

Esta necessidade de substituição urgente dos CFL do BE veio a revelar outras limitações dos caudalímetros que se encontravam em utilização, nomeadamente o facto de estes não possuírem correções face à variação da viscosidade com a temperatura. Para além dessa limitação ainda foi reconhecido que poderia ser útil que o caudal fosse também apresentado no formato de caudal *standard*, de forma a haver correção direta face às variações de temperatura e pressão absoluta.

O desafio deste trabalho incidiu na investigação e desenvolvimento de instrumentação capaz de medir caudais de ar em condições de pressão absoluta correspondentes às existentes em altitude, nomeadamente na gama de altitudes de operação dos reguladores de oxigénio (dos zero aos 50 mil pés), tendo em conta também eventuais variações de temperatura.

4.4 Caracterização dos Caudalímetros Adquiridos pela Empresa

No manual técnico de instruções de manutenção de equipamentos de oxigênio, que diz respeito ao BE de RO existente na OGMA – MCO, são divulgadas todas as especificações e requisitos funcionais dos seus equipamentos constituintes, entre eles os caudalímetros. A gama de caudal e a precisão mínima que os CFL 1 e 2 devem apresentar segundo a sua documentação técnica são [7]:

Gama de leituras: 0-150 l/min

Precisão: 1% fs (*full scale*)

Tendo em conta as limitações do sistema de caudalímetros adaptado no BE, referidas no subcapítulo anterior, este não cumpria o requisito de precisão imposto pelo manual do BE, por essa razão a manutenção de RO deveria continuar suspensa até que se encontrasse uma alternativa.

Dada a urgência da empresa na substituição desse sistema, esta optou por adquirir caudalímetros mássicos de dissipação térmica, que apesar de terem um princípio de funcionamento diferente do original, cumpriam o requisito de precisão e não implicavam grande investimento.

O caudalímetro de dissipação térmica selecionado é do tipo caudalímetro de transferência de calor e trata-se do modelo *Red-y-Smart Series for Gasflow*, versão *Hi-Performance*, da empresa fabricante de caudalímetros suíça *Vögtlin Instruments*.

Estes caudalímetros de tecnologia avançada, vêm calibrados de origem às condições impostas pelo cliente e apresentam, para além do *display* em cada caudalímetro, um *software* de interface de fácil utilização que permite leituras de caudal *standard* em tempo real (ver figura 4.11).



Figura 4. 11 – Red-y-Smart: (a) Vista Lateral; (b) Display Incorporado; (c) Software

Na tabela 4.1 apresentam-se as características deste modelo de caudalímetro de acordo com a respetiva ficha de dados fornecida pelo fabricante:

Tabela 4. 1 – Características do CMDT; Adaptada de [16]

| | |
|--------------------|----------------------------|
| Modelo | VOGT LIN RED-Y-SMART-METER |
| Tipo | GSM-D9TA-BN00 |
| Gama de Leitura | 0-150 |
| Unidade de Leitura | ls/min |
| Precisão | ±0,3% fs |
| Pressão de Entrada | 25 mbar |
| Material | Alumínio |

Foram adquiridos dois CMDT (CMDT1 e CMDT2), com a finalidade de substituir os CFL existentes no BE (CFL1 e CFL2 respetivamente).

A OGMA optou por solicitar que a calibração dos dois caudalímetros (tabela 4.2) fosse feita a diferentes condições de referência. Isto porque um dos caudalímetros (CMDT1) se destina à medição de caudais por vezes a baixas pressões absolutas, cuja gama de valores se estende desde a pressão atmosférica ao nível do mar até à pressão atmosférica à altitude de cinquenta mil pés, enquanto o outro caudalímetro (CMDT2) se destina a medir caudais apenas à pressão atmosférica ao nível do mar, que ronda o valor de referência 1013,25 milibar.

As condições de protocolo de calibração são apresentadas na tabela 4.2:

Tabela 4. 2 – Condições de Protocolo de Calibração

| Condições de Referência | CMDT 1 | CMDT 2 |
|-------------------------|-------------|----------------|
| Gás | Azoto (N2) | Ar Atmosférico |
| Temperatura | 15 °C | 15 °C |
| Pressão | 300,90 mbar | 1013,25 mbar |

Apesar do sistema adquirido satisfazer os requisitos impostos pelo manual e corresponder às expectativas de melhoria tecnológica, este veio a levantar um outro problema, que está relacionado com facto de só apresentar leituras corrigidas, ou seja, caudal *standard*.

Os testes de certificação funcional aos quais são sujeitos os RO têm um protocolo associado que está expresso no manual técnico do BE. No protocolo de testes o caudal é expresso na forma de caudal atual, ou seja, caudal às condições atuais de pressão e temperatura.

Nestas circunstâncias os técnicos da produção sentiam-se obrigados a trabalhar com o sistema de caudalímetros de tecnologia ultrapassada e pouco precisa, deixando de parte os CMDT que haviam sido acabados de adquirir pela empresa.

Perante estas circunstâncias, efetuou-se uma pesquisa de soluções por forma a voltar a ter o BE de RO a funcionar corretamente.

5. Propostas de Melhoria do Sistema de Medição de Caudal

Após identificada a condição do BE de RO explicada no capítulo anterior, procedeu-se a alguma experimentação neste, de forma a analisar o problema em questão. Os ensaios de experimentação serão detalhados adiante.

5.1 Montagens Experimentais

Como foi visto no subcapítulo 3.2 os CFL obedecem ao modelo teórico regido pela lei de Hagen-Poiseuille. Em situações reais, são normalmente adotados outros modelos. O modelo utilizado neste estudo está de acordo com alguns manuais de utilização de fabricantes de CFL. Este afirma que a curva de calibração de um determinado CFL em determinadas condições de ensaio é apresentada na forma [17]:

$$Q = [B \times \Delta p + C \times (\Delta p)^2] \quad \text{Equação 5.1}$$

Onde:

B, C – constantes de calibração

A equação 5.1 trata-se da equação característica da curva de calibração de um determinado CFL às condições de calibração, sendo que por norma se tratam das condições *standard*. Esta forma de caudal também é designada por caudal não corrigido.

Como foi referido no subcapítulo 3.2, uma das características deste tipo de caudalímetros é a sua dependência da viscosidade do fluido, como tal, variações deste parâmetro devem ser contabilizadas no cálculo do caudal. Assim, o caudal volumétrico atual de um CFL pode ser definido como o caudal corrigido em função da viscosidade do fluido, este pode ser obtido pela equação 5.2 [17]:

$$Q_a = [B \times \Delta p + C \times (\Delta p)^2] * \frac{\mu_{std}}{\mu_a} \quad \text{Equação 5.2}$$

Onde:

μ_{std} – coeficiente de viscosidade *standard*

μ_a – coeficiente de viscosidade atual

A viscosidade pode ser obtida em função da temperatura através da fórmula de Sutherland apresentada anteriormente no capítulo 2.1, equação 2.9.

Estandarizando o caudal atual da mesma forma que está demonstrada no capítulo 3.3, obtém-se o caudal volumétrico *standard* de um CFL, como apresentado na equação 5.3 [17]:

$$Q_{std} = [B \times \Delta p + C \times (\Delta p)^2] * \frac{\mu_{std}}{\mu_a} * \frac{T_{std}}{T_a} * \frac{p_a}{p_{std}} \quad \text{Equação 5.3}$$

Desta forma é possível relacionar as 3 formas de caudal.

Após a aquisição dos CMDT optou-se pela montagem em série, como ilustrada na figura 5.1, como forma de comparar as leituras de caudal medidas pelos caudalímetros de fluxo laminar (CFL1 e CFL2) com as medidas pelos caudalímetros mássicos de dissipação térmica (CMDT1 e CMDT2) respetivamente.

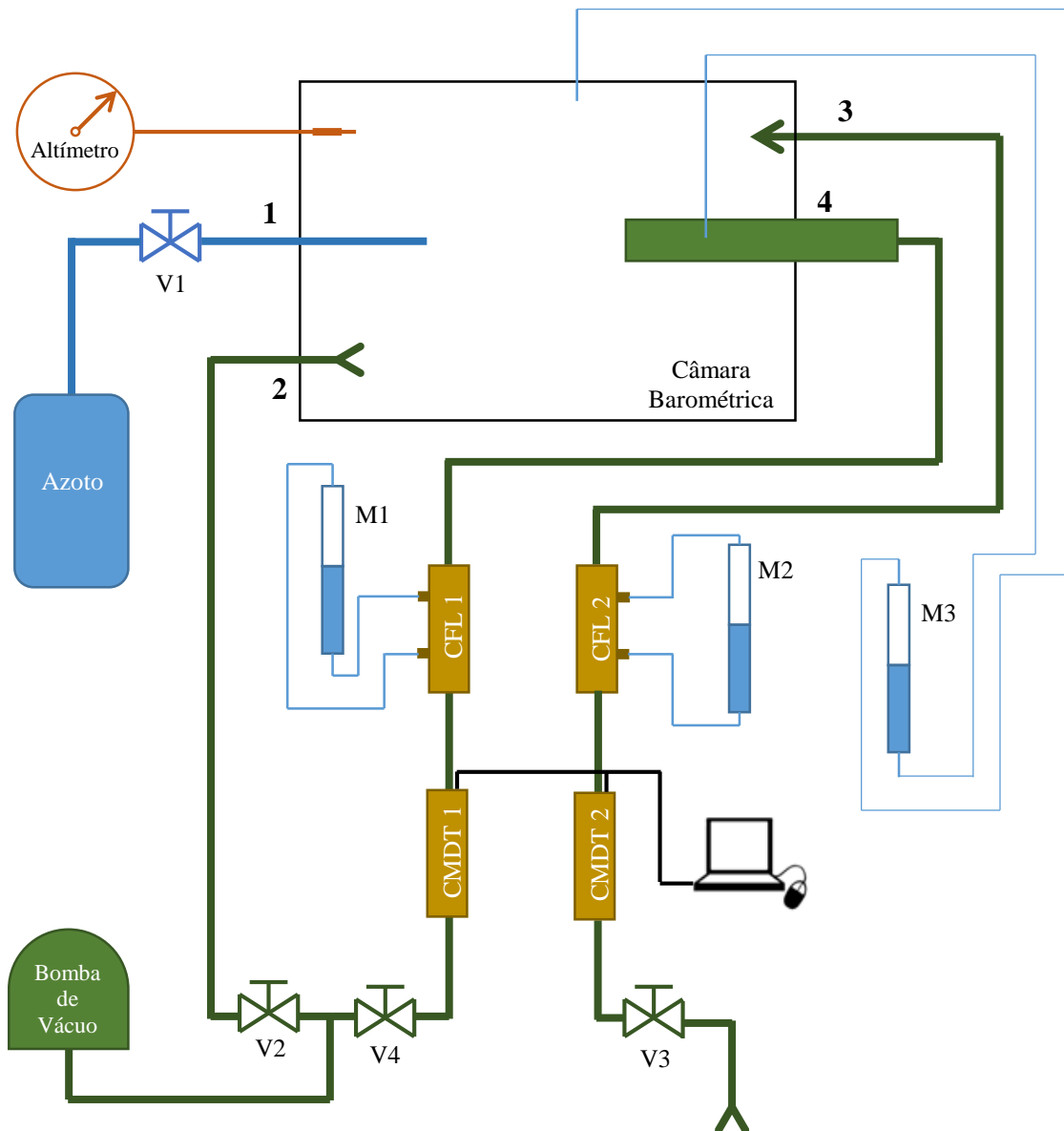


Figura 5. 1 – Montagem Experimental 1

Foram realizados ensaios à pressão ambiente, com ar atmosférico (sem RO), de forma a comparar os valores de caudal obtidos por cada um dos tipos de caudalímetro para um mesmo fluxo de passagem e chegou-se à conclusão que os valores divergiam substancialmente. Os resultados de um desses ensaios são apresentados na tabela 5.1. Este ensaio foi realizado na linha de fluxo 4 e foram analisados cinco pontos de comparação entre as leituras do CFL1 e o CMDT1.

Tabela 5. 1 – Comparação entre as Leituras do CFL1 e CMDT1

| CFL [l/min] | CMDT [ls/min] | CMDT [l/min] | Erro Absoluto [l/min] | Erro Relativo [%] |
|----------------|------------------|-----------------|--------------------------|----------------------|
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | - |
| 5,00 | 5,95 | 6,29 | 1,29 | 0,21 |
| 50,00 | 50,05 | 52,92 | 2,92 | 0,06 |
| 100,00 | 95,98 | 101,48 | 1,48 | 0,01 |
| 150,00 | 137,85 | 145,76 | 4,24 | 0,03 |

Os valores de caudal dados pelo CFL e o CMDT (duas primeiras colunas da tabela 5.1) não são comparáveis, isto porque são apresentados em unidades distintas. Sendo que o CFL apresenta leituras de caudal não corrigido e o CMDT leituras de caudal corrigido face às condições *standard*. De forma a comparar as leituras indicadas pelos dois instrumentos procedeu-se à conversão do caudal *standard* fornecido pelo CMDT em caudal não corrigido (originando a terceira coluna da tabela 5.1). A comparação entre os valores (primeira com terceira coluna) permite confirmar o que já havia sido dito: o CFL adaptado na coluna de água anterior vem introduzir erros de leitura, de tal forma que impossibilita a sua adaptação no BE. Isto porque o sistema CFL-coluna de água adaptado, não respeita o requisito mínimo de precisão estabelecido (1% fs).

A montagem da figura 5.2, é semelhante à montagem da figura 5.1, mas na qual para além da coluna de água está conectado um manómetro às tomadas de pressão do CFL. Esta foi realizada com o intuito de relacionar um caudal de passagem padrão, fornecido pelo CMDT, com um diferencial de pressão obtido no CFL. O objetivo principal desta montagem era aproximar a curva de calibração do caudalímetro de fluxo laminar.

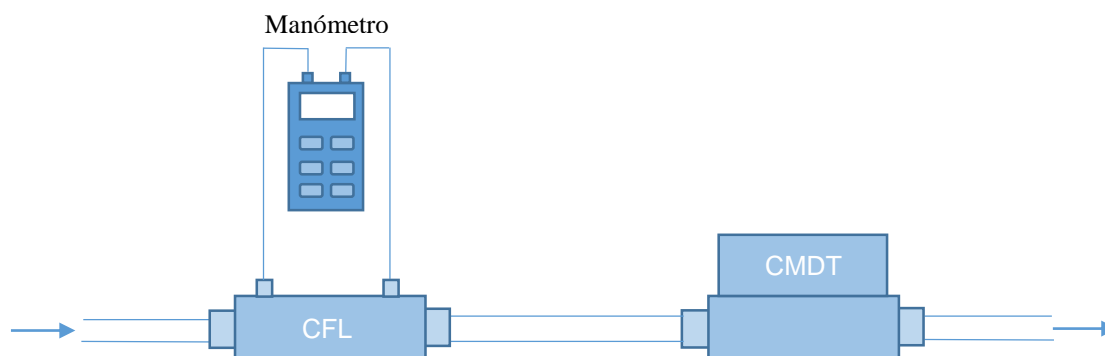


Figura 5. 2 – Montagem Experimental 2

Na tabela 5.2 encontram-se os valores obtidos de um ensaio no qual se realizaram 2 avanços e 2 recuos ao longo da escala de caudal. A escolha dos valores de caudal está relacionada com o facto de o manómetro conectado ao CFL estar em paralelo com a coluna de líquido (não representada na figura 5.2) sendo que os 4 pontos escolhidos correspondem aos valores indicados na coluna de líquido de 5, 50, 100, 150 litros por minuto.

Tabela 5. 2 – Diferencial de Pressão vs Caudal Volumétrico Standard

| AVANÇO | | RECUO | | AVANÇO | | RECUO | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CMDT | CFL | CMDT | CFL | CMDT | CFL | CMDT | CFL |
| ls/min | polH2O | ls/min | polH2O | ls/min | polH2O | ls/min | polH2O |
| 5,72 | 0,32 | 5,95 | 0,32 | 5,95 | 0,32 | 6,0 | 0,33 |
| 50,3 | 3,03 | 50,45 | 3,02 | 50,3 | 3,01 | 50,3 | 3,02 |
| 95,9 | 6,13 | 96,2 | 6,13 | 96,1 | 6,14 | 96,0 | 6,14 |
| 138,2 | 9,21 | 137,9 | 9,21 | 138,2 | 9,21 | 138,2 | 9,21 |

De acordo com os dados obtidos, é apresenta na figura 5.3, uma regressão linear da curva de caudal volumétrico *standard* em função do diferencial de pressão efetuada através do *Excel*.

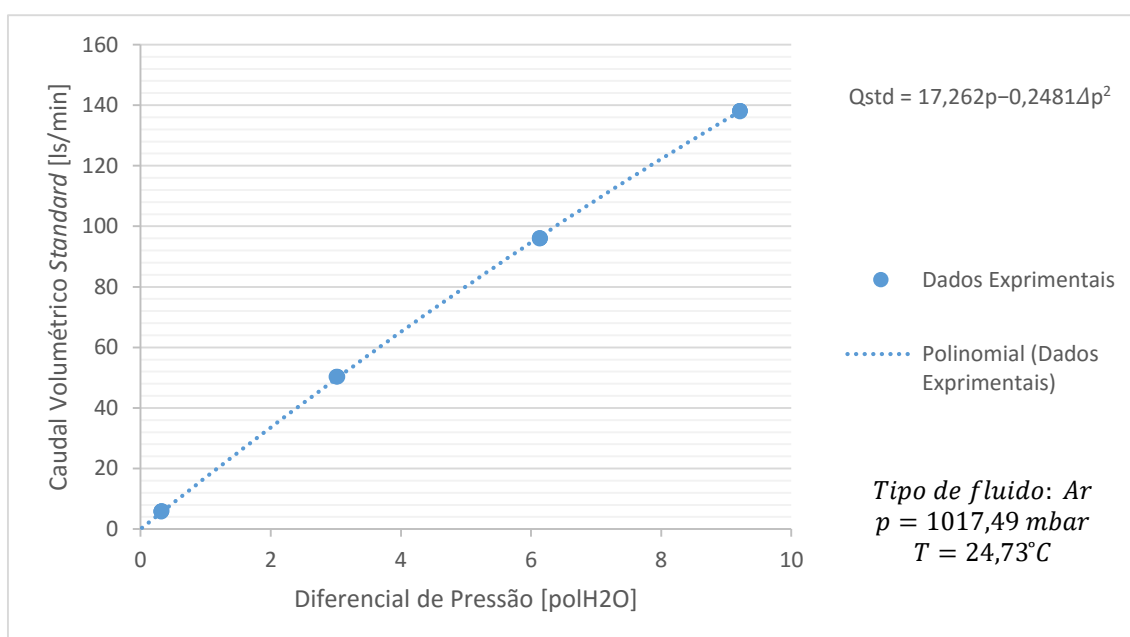


Figura 5. 3 – Curva de Caudal Volumétrico Standard em Função do Diferencial de Pressão

A curva de regressão linear obtida em *Excel* diz respeito à relação entre o diferencial de pressão obtido entre as duas tomadas de pressão do CFL e o caudal volumétrico de passagem. Sendo que a relação é apenas válida para as condições de ensaio, ou seja, tipo de fluido, temperatura e pressão de ensaio. A pressão e a temperatura consistem na média de valores observada no ensaio e foram obtidas através de um barómetro e termómetro de precisão.

A curva da figura 5.3 trata-se da curva de calibração deste CFL nas respetivas condições de ensaio.

A partir da experimentação anterior é possível definir uma curva característica de calibração deste CFL tomando como condições *standard* as seguintes:

$$\begin{aligned}
 p_{std} &= 101325 \text{ Pa} \\
 T_{std} &= 288,15 \text{ K (15,00°C)} \\
 \mu_{std} &= 1,78938 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}
 \end{aligned}$$

E como condições de ensaio, ou condições atuais, as observadas

$$\begin{aligned} p_a &= 101749 \text{ Pa} \\ T_a &= 297,88 \text{ K } (24,73^\circ\text{C}) \\ \mu_a &= 1,83595 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

A curva apresentada no gráfico da figura 5.3 trata-se de uma curva corrigida, ou seja, representa a relação $Q_{std} - \Delta p$ para as condições de ensaio. Conhecendo as condições *standard* e as condições de ensaio é possível obter uma relação semelhante para condições *standard*. Esta relação é própria de cada CFL e é designada por equação característica da curva de calibração do CFL. Para este caso concreto a equação característica da curva de calibração do CFL é dada pela equação 5.4:

$$Q = 18,233\Delta p - 0,2621(\Delta p)^2 \quad \text{Equação 5.4}$$

A curva de calibração do CFL para condições padrão é apresentada no gráfico da figura 5.4.

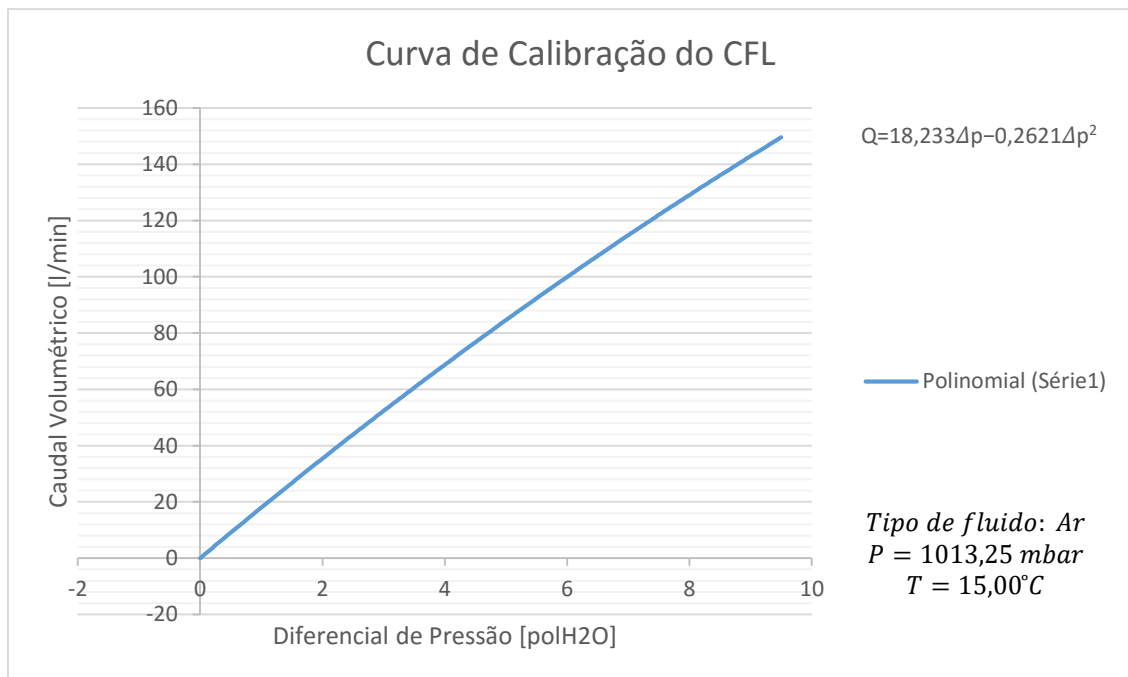


Figura 5. 4 – Curva de Calibração do CFL em Condições *Standard*

Depois de conhecida a curva de calibração do CFL para condições *standard* é possível determinar os 3 tipos de caudal:

- Caudal volumétrico não corrigido
- Caudal volumétrico atual
- Caudal volumétrico *standard*

Isto caso se conheça a pressão absoluta e a temperatura dentro da câmara.

Esta análise matemática permite resolver o problema em questão. Uma possibilidade de solução seria a de executar uma tabela de conversão de caudal

standard para caudal atual, ou efetuar o cálculo a partir do diferencial indicado pelo manómetro, aplicando a equação 5.4. No entanto, estas soluções não foram consideradas visto que o tempo despendido em cada conversão ou cálculo atrasaria em demasia o processo.

Para solucionar o problema procurava-se uma solução autónoma, capaz de efetuar o cálculo em tempo real. Nesse sentido, foi efetuada uma pesquisa de soluções de modernização existentes no mercado.

Algumas das soluções encontradas serão apresentadas no subcapítulo 5.2.

5.2 Análise de Soluções

Para cada solução apresentada é feita uma breve análise à sua viabilidade que tem em conta a eficiência com a qual resolve o problema e os benefícios que esta traz à empresa e por outro lado também tem em conta o seu custo de investimento.

Aquisição de um Novo Banco de Ensaio de RO

Modelo SE0230 da Carleton

Este modelo de BE de RO, da *Carleton* (figura 5.5), é projetado para executar testes funcionais a todos os reguladores de oxigénio existentes no mercado. Este inclui a capacidade de realização de testes a pressão positiva aquando a presença de elevada aceleração G. Possui modo de correção automática de caudal sem a necessidade de utilização de tabelas de conversão [18]. O preço associado a este BE ronda o valor de meio milhão de dólares americanos.



Figura 5. 5 – SE0230 Support Equipment – Regulator Test Stand [18]

A aquisição deste BE estenderia a capacitação da OGMA no negócio de manutenção de reguladores de oxigénio, visto que poderia oferecer manutenção de maior qualidade e a maior quantidade de modelos de RO. Esta solução é a que permite maior avanço tecnológico, embora obrigue, naturalmente, a um grande investimento.

Modelo OTS570 da CME

O modelo OTS570 é um BE portátil da CME (figura 5.6) projetado para a manutenção de componentes do sistema de suporte de vida de aeronaves militares, nomeadamente os reguladores de oxigénio. Este cobre toda a gama de reguladores de oxigénio utilizada pela Marinha Norte Americana. O facto de ser portátil permite a sua instalação em porta-aviões, podendo também ser instalado em terra [19]. A aquisição deste BE representaria um investimento para a OGMA que se encontra entre 90 e 120 mil dólares americanos.

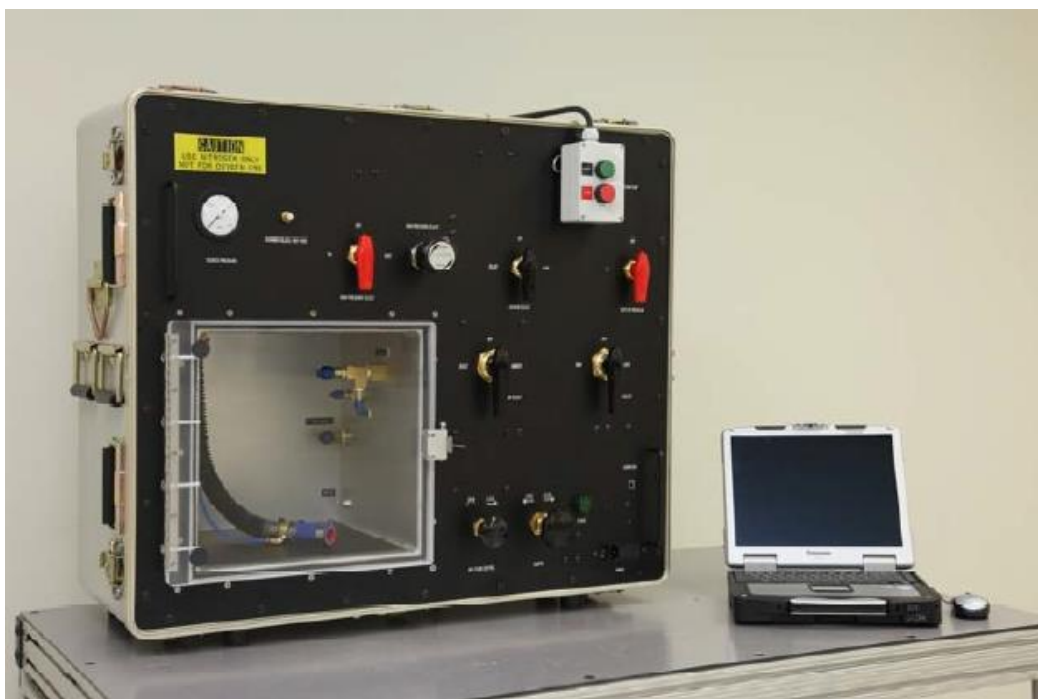


Figura 5. 6 – Model OTS570 Automated Portable Oxygen Components Test Set [19]

Este BE permitiria à OGMA estender de alguma forma a sua capacidade de manutenção de modelos de RO a um preço bastante mais acessível que o anterior, embora não permita um salto tecnológico tão grande.

Adaptação de Novo Sistema de Caudalímetros no Atual BE

Após a análise feita à viabilidade das soluções anteriores, chegou-se à conclusão que não se justificava a compra de um novo BE. Isto porque a empresa não estava disposta a fazer grandes investimentos para capacitação neste negócio em particular, mas sim interessada em resolver o problema em questão.

O problema identificado não envolvia todo o BE, apenas os seus caudalímetros, devido ao facto de não fornecerem leituras de caudal atual.

As soluções analisadas para o efeito são as apresentadas em seguida:

Caudalímetros Digitais Inteligentes da CME

Este modelo de caudalímetros da CME constitui a opção de instrumentação que equipa o BE da CME, modelo OTS570, apresentado como solução acima. O modelo em causa não é mais do que a versão mais recente do modelo de CFL adaptado no BE existente na OGMA, figura 4.10. Esta versão melhorada, fabricada em aço inox, é equipada com sonda de temperatura e pressão permitindo leituras em caudal atual e *standard*. As suas características são sintetizadas na sua ficha de dados apresentada na tabela 5.3.

Tabela 5. 3 – Caudalímetros Digitais Inteligentes da CME

| | |
|---------------------------|-------------------------|
| Modelo | 60B-1-150AN |
| Descrição | CFL Digital Inteligente |
| Gama | 0-150 l/min ou ls/min |
| Gás | Ar ou Azoto |
| Temperatura de Calibração | 70 F |
| Pressão de Calibração | 1013,25 mbar |
| Precisão | ±1,0% leitura |
| Material | Aço Inox |



Figura 5. 7 – CFL em Aço Inox da CME [35]



Figura 5. 8 – Sistema Completo com Display e Sonda de Temperatura [35]

Solução de Melhoria Tecnológica Utilizando Sensores MEMS

Analisando comparativamente o sistema de caudalímetros digitais inteligentes da CME e os CFL instalados no BE, chegou-se à conclusão que a solução de melhoria tecnológica desenvolvida pela CME de um modelo para o outro, consistia na colocação

de uma sonda de temperatura a montante do fluxo a medir, de forma a corrigir a leitura de fluxo em função da variação da viscosidade.

No sentido de reproduzir uma melhoria tecnológica similar, foi proposta uma solução de melhoria tecnológica da instrumentação original utilizando sistemas micro electro mecânicos (MEMS) de custo muito acessível, que associados a um sistema de aquisição de dados programável poderiam fornecer leituras de caudal corrigido face à variação da viscosidade (caudal atual). Foi nesse sentido que foi orientado este estudo, que será abordado em maior detalhe nos seguintes subcapítulos.

5.3 Sistema de Aquisição de Dados

Neste subcapítulo pretende-se apresentar e descrever os elementos utilizados no sistema de aquisição de dados, bem como explicar o seu modo de funcionamento.

A aquisição de dados é o processo de medição de um fenómeno elétrico ou físico, como tensão, corrente, temperatura, pressão ou som, com o uso de um computador. Um sistema de aquisição de dados (ou em inglês, *Data Acquisition System* DAS) é formado por sensores, *hardware* de aquisição e medida de dados e um computador com *software* programável. A composição de um DAS é ilustrada na figura 5.9 [20].

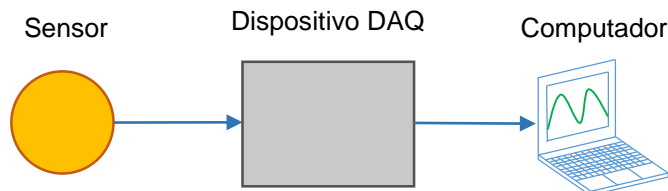


Figura 5. 9 – Sistema de Aquisição de Dados

Sensores

A medição de um fenómeno físico, como a temperatura de uma sala, intensidade de uma fonte luminosa ou força aplicada a um objeto, começa pelo sensor. Um sensor tem normalmente a função de transdutor, ou seja, converte fenómenos físicos em sinais elétricos mensuráveis. Dependendo do tipo de sensor, a sua saída elétrica pode ser uma característica de tensão, corrente, resistência ou outro atributo elétrico que varie com o tempo. Alguns sensores podem exigir componentes e circuitos adicionais de forma a fornecerem um sinal que possa ser lido com exatidão e segurança por um dispositivo DAQ (*Data Acquisition*).

Um caso particular de sensores, que é cada vez mais comum na indústria, são os sistemas micro eletromecânicos (*Microelectromechanical Systems* ou MEMS), estes são dispositivos em miniatura que permitem o funcionamento de sistemas complexos. Geralmente são compostos por uma unidade central que processa os dados (microprocessador) e por outros componentes que interagem com o exterior (micro sensores). Estes sistemas encontram-se no domínio público, sendo que qualquer indivíduo os pode adquirir, e fornecem muito boas soluções a preços muito acessíveis.

A solução desenvolvida utilizou dois sensores MEMS, um sensor de pressão e temperatura e um sensor de pressão diferencial, as suas características são apresentadas em seguida.

Sensor de Pressão e Temperatura (MS5611-01BA03)

O MS5611-01BA03, ilustrado na figura 5.10, é um sensor de pressão barométrica e temperatura MEMS de nova geração e alta resolução. Este é muito utilizado para medição de altitudes. Sendo possível processar os dados de pressão barométrica fazendo-lhes corresponder uma altitude geopotencial. Segundo o fabricante, o sensor tem uma resolução de 10 cm. Apresenta dimensões muito pequenas, apenas 5X3 mm e uma altura de 1mm [21].

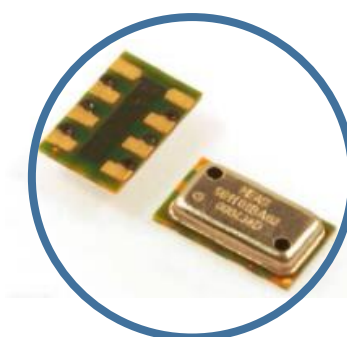


Figura 5. 10 – MS5611-01BA03 [21]

Tabela 5. 4 – Ficha de Dados do MS5611-01BA03; Adaptada de [21]

| Características de Operação ($V_S = 3\text{ V}$) | Mínima | Máxima | Unidade |
|--|--------|--------|---------|
| Gama de Pressão | 10 | 1200 | mbar |
| Precisão (25°C ; 750 mbar) | -1,5 | +1,5 | mbar |
| Precisão ([-20;+85] °C [450;1100] mbar) | -2,5 | +2,5 | mbar |
| Gama de Temperatura | -40 | +85 | °C |
| Precisão | -0,8 | +0,8 | °C |

Onde:

V_S – tensão de alimentação

Sensor de Pressão Diferencial (MPXV5004DP)

O MPXV5004DP (figura 5.11) é um sensor de pressão diferencial MEMS, transdutor piezoresistivo que tem uma vasta gama de aplicações, mas particularmente as que requerem um microcontrolador ou microprocessador com entradas A/D (Analógicas e/ou Digitais). Este sensor combina um medidor de pressão integrado, altamente sensível com técnicas avançadas de fabrico, metalização de filme fino e processamento bipolar para fornecer um elevado nível de precisão de sinal de saída analógico que é proporcional à pressão aplicada [22].

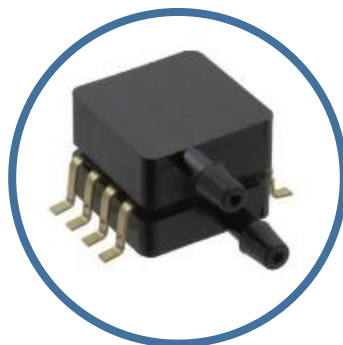


Figura 5. 11 – **MPX5004DP** [22]

Tabela 5. 5 – Ficha de Dados do **MPXV5004DP**; Adaptada de [22]

| Características de Operação ($V_S = 5,0\text{ V}$) | Mínima | Típica | Máxima | Unidade |
|--|--------|--------|--------|-----------------------------|
| Gama de Pressão | 0 | - | 400 | mm H ₂ O |
| Full Scale Span (V_{FSS}) | - | 3 | - | V |
| Precisão ([0; 100] mmH ₂ O [10; 60] °C) | -1,5 | - | +1,5 | % V_{FSS} (com auto zero) |
| Precisão ([100; 400] mmH ₂ O [10; 60] °C) | -2,5 | - | +2,5 | % V_{FSS} (com auto zero) |
| Precisão ([0; 400] mmH ₂ O [10; 60] °C) | -6,25 | - | +6,25 | % V_{FSS} (sem auto zero) |

O zero lido no sensor pode ser afetado por aspetos como: sensibilidade, forças externas e/ou posições de montagem. Por esta razão é recomendado introduzir-se uma função auto zero no código de programação do MEMS. O auto zero trata-se de uma técnica que compensa o *offset* causado pelos aspetos já referidos, desta forma reduz-se significativamente o erro face ao valor verdadeiro.

Hardware de Aquisição de Dados (Arduino)

Para a aquisição de dados utilizou-se um sistema *Arduino*.

O *Arduino* é um microcontrolador programável com memória interna, capaz de executar inúmeras operações conforme as instruções que lhe são carregadas [23]. A versão utilizada neste trabalho foi o *Arduino Leonardo*, ilustrado na figura 5.12, as suas características são apresentadas na tabela 5.6.



Figura 5. 12 – **Arduino Leonardo** [23]

Este modelo utiliza um microprocessador *Atmega32u4* da *Atmel* (figura 5.13), tendo um oscilador de cristal de 16MHz, 20 portas digitais para leitura e escrita das quais 7 podem ser utilizadas como saídas *PWM*¹ e 12 como entradas analógicas. As entradas analógicas estão ligadas a um conversor analógico digital (ADC) de 8 bits. A interação com outros tipos dispositivos pode ser feita através de diversas formas e protocolos como por exemplo *I2C*, *Serial/USB* ou *SPI* [23].

A sua alimentação pode ser feita através do USB ou de uma fonte externa através de uma entrada *jack*.



Figura 5. 13 – Micro-Processador *Atmega32u4* [24]

Tabela 5. 6 – Ficha de dados do Microprocessador *Atmega32u4* [23]

| Microcontrolador | Atmega32u4 |
|---------------------------------|--|
| Tensão de Funcionamento | 5V |
| Tensão de Entrada (recomendado) | 7-12V |
| Tensão de entrada (limite) | 6-20V |
| Pinos E/S digitais | 20 (7 <i>PWM</i> ¹) |
| Pinos de entrada analógica | 12 |
| Intensidade por pino | 40 mA |
| Intensidade no pin 3.3 V | 50 mA |
| Memória Flash | 32 KB (4 KB <i>bootloader</i> ²) |
| SRAM | 25 KB |
| EEPROM | 1 KB |
| Velocidade de relógio | 16 MHz |

¹ *Pulse-Width Modulation* ou em português Modulação por Largura de Pulso (MLP)

² Gestor de Arranque

Na figura 5.14 são exibidos os pinos de alimentação para conexão de *shields* e módulos na placa *Arduino Leonardo*, eles são [24]:

IOREF - Fornece uma tensão de referência para que *shields* possam selecionar o tipo de interface apropriada. Desta forma, *shields* que funcionam com placas *Arduino* que são alimentadas com 3,3V podem ser utilizados com placas alimentadas a 5V e vice-versa.

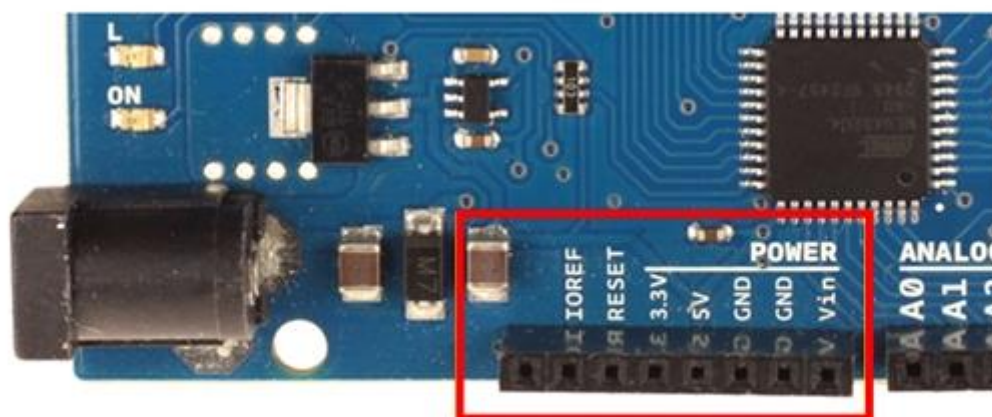
RESET - Pino conectado a pino de RESET do microcontrolador. Pode ser utilizado para um reset externo da placa *Arduino*.

3,3 V - Fornece tensão de 3,3V. para alimentação de *shield* e módulos externos. Corrente máxima de 50 mA.

5 V - Fornece tensão de 5 V para alimentação de *shields* e circuitos externos.

GND - Pinos de referência, terra.

VIN - Pino para alimentar a placa através de *shield* ou bateria externa. Quando a placa é alimentada através do conector *jack*, a tensão da fonte deve estar nesse pino.



Pinos de Alimentação

Figura 5. 14 – Pinos de Alimentação do *Arduino* Leonardo [24]

Software de Aquisição de Dados

As placas de *Arduino* utilizam um *software* próprio para o efeito e uma linguagem baseada em *Wiring*, semelhante a C/C++, é possível a um novo utilizador familiarizar-se com o ambiente de programação, *Arduino IDE (Integrated Development Environment)*, e rapidamente ter um projeto a funcionar.

Este *software* está disponível em formato *Open-Source*, sendo que existem disponíveis na Internet inúmeros exemplos, documentos tutoriais, bibliotecas e ainda um fórum exclusivo para a discussão de assuntos relacionados com projetos *Arduino*.

A vasta quantidade de informação disponível em modo aberto permite ao utilizador ultrapassar facilmente os obstáculos de percurso, atendendo a que a quantidade de utilizadores de *Arduino* já atingiu números admiráveis.

Como cabe ao utilizador programar o microcontrolador, este pode adaptar o seu código de forma específica para cada aplicação, o que torna o *Arduino* compatível com outros equipamentos.

Por outro lado, o reduzido preço deste equipamento (20€ para o *Arduino Leonardo*) acarreta um compromisso no seu desempenho, sendo perceptível a existência de algumas limitações de ordem técnica, tratando-se de um dos poucos problemas deste equipamento. O cristal de 16 MHz limita o número máximo de instruções por segundo executáveis e a arquitetura do microprocessador da *Atmel* limita o tipo de operações matemáticas a executar, pois não possuiu virgula flutuante. As operações matemáticas tornam-se então mais complexas e demoradas. Esta questão pode ser ultrapassada guardando os dados na forma em que são adquiridos e fazendo posteriormente o seu tratamento, conversão de unidades e restantes operações num computador após o final da sessão. No caso do uso de telemetria, dever-se-á executar essas operações após a receção dos dados na estação base, evitando a sobrecarga da unidade móvel. [25]

No módulo *Arduino* utilizado, foi implementado um sistema de instrumentação com capacidade para aquisição de dados que inicialmente eram gravados como ficheiro txt e posteriormente trabalhados em *Matlab*. Rapidamente se chegou à conclusão que este processo era muito demorado tendo em conta que o objetivo era obter uma geração de resultados em forma numérica e gráfica em tempo real.

Tendo em conta os objetivos a alcançar adotou-se o *LabVIEW* como *software* de trabalho de dados em alternativa ao *Matlab*.



Figura 5. 15 – Ambiente de Programação *Arduino IDE*

Software de Trabalho de Dados (*LabVIEW*)

O *LabVIEW* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica originária da *National Instruments*.

Os seus principais campos de aplicação são a realização de medições e a automação. A linguagem de programação que o *LabVIEW* utiliza está de acordo com o modelo de fluxo de dados (*dataflow*), o que oferece a esta linguagem vantagens na

aquisição e manipulação de dados. A principal vantagem desta interface gráfica é a facilidade com que se programa, sendo que o programador do sistema de instrumentação não tem necessariamente de ter conhecimentos avançados de programação. O ambiente de programação do *LabVIEW* utiliza diagramas de blocos, pré-programados, que na verdade, não são mais que ferramentas conceptuais que fazem parte do dia-a-dia de um engenheiro [26].

Os programas em *LabVIEW* são designados de VI (*Virtual Instruments* ou Instrumentos Virtuais em português) estes são compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa.

De forma a automatizar todo o processo e a obter resultados numéricos e gráficos em tempo real foi seleccionada a linguagem de programação *LabVIEW*.

5.4 Solução de Melhoria Tecnológica

Neste subcapítulo pretende-se demonstrar sucintamente o modo como foi realizada a montagem do sistema de aquisição de dados, ou seja, a montagem entre a placa *Arduino* e os MEMS utilizados, e a forma como este sistema interage com o BE de RO nomeadamente com o CFL.

Montagem da Instrumentação

Com o objetivo de modernizar tecnologicamente os CFL, optou-se por recriar uma solução tecnológica semelhante à existente nos caudalímetros digitais inteligentes da *CME*. Para tal utilizou-se, como já foi referido, dois sensores MEMS, uma placa *Arduino* e um computador. A figura 5.16 ilustra a montagem efetuada entre o CFL e o sistema de aquisição de dados. O sensor de pressão absoluta e temperatura (*MS5611-01BA03*) foi colocado a montante do elemento de fluxo laminar, por forma a facultar as leituras atuais destas duas grandezas. O sensor de pressão diferencial (*MPXV5004DP*) foi utilizado para medir a queda de pressão ocorrente entre as duas tomadas de pressão do CFL. Ambos os MEMS foram conectados ao *hardware* de aquisição de dados (*Arduino*) no qual os dados são carregados e posteriormente trabalhados de forma a originar medições de caudal.

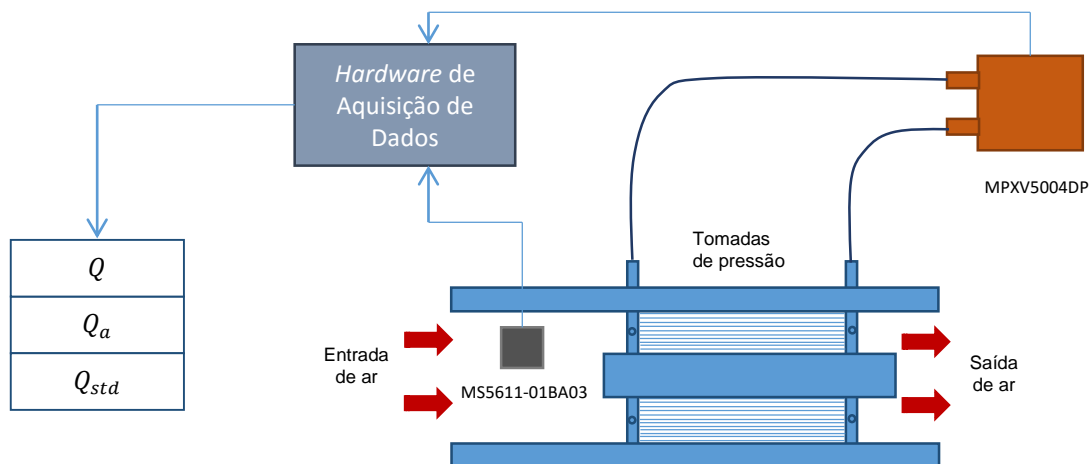


Figura 5. 16 – Montagem do Sistema de Instrumentação

Os ensaios preliminares realizados, apresentados no capítulo 5.1, permitiram aproximar a curva de calibração do CFL utilizado. Desta forma através da aplicação da sua equação é possível obter medições de caudal a partir do diferencial de pressão detetado nas tomadas de pressão do CFL.

Já foi visto que o caudal volumétrico de um CFL pode ser apresentado de 3 formas: caudal volumétrico não corrigido Q , caudal volumétrico atual Q_a (corrigido face à variação da viscosidade do fluido) e caudal volumétrico *standard* Q_{std} (corrigido face à variação de viscosidade, temperatura e pressão do fluido). Sendo que a maior deficiência do sistema instalado no BE era o facto de não apresentar leituras precisas de caudal corrigido face à viscosidade (caudal volumétrico atual), a apresentação de leituras desta forma de caudal foi a prioridade dada ao sistema. Ainda assim, este também apresenta leituras das outras formas de caudal, não só para capacitar o sistema, mas para poder compará-las com as de outros sistemas.

Desta forma, depois de desenvolvido este projeto, foi possível compará-lo com os outros dois sistemas de medição de caudal existentes no BE: a coluna de água que fornece leituras de caudal volumétrico não corrigido (é importante lembrar que este sistema tem fraca precisão ($> 1\% fs$) dada a incompatibilidade com os CFL); os CDMT que fornecem leituras precisas de caudal volumétrico *standard*.

Integração da Solução de Instrumentação no BE

Apesar das reduzidas dimensões do sensor *MS5611-01BA03* não foi viável coloca-lo no interior do CFL, ou na tubagem imediatamente a montante, visto que poderia introduzir vórtices e turbulência indesejada. Em vez disso optou-se por colocar o sensor no interior da câmara barométrica (ver figura 5.17) executando um furo numa das tubagens para fazer passar os fios através dos quais este comunica com a *Arduino*. Furo esse que foi posteriormente isolado com silicone de forma a eliminar as fugas no sistema.



Figura 5. 17 – Sensor *MS56-11BA03* em Funcionamento, no Interior da Câmara Barométrica do BE

A presença deste sensor no interior da câmara barométrica permitia uma monitorização em tempo real das grandezas em “altitude”.

Por forma a comparar o sistema desenvolvido com os outros dois sistemas em funcionamento no BE (coluna de água e CMDT) procurou efetuar-se uma montagem de forma a serem utilizados os três equipamentos sem interferirem uns com os outros. Como tal procedeu-se a uma montagem em paralelo das linhas de pressão estática entre o MEMS de pressão diferencial e a coluna de água. Assim, o caudal poderia ser obtido de três formas: pelo CMDT colocado em linha com o CFL; pelo diferencial de pressão indicado na coluna de água e pelo sistema de aquisição de dados desenvolvido. A montagem dos 3 sistemas é ilustrada pelo esquema da figura 5.18.

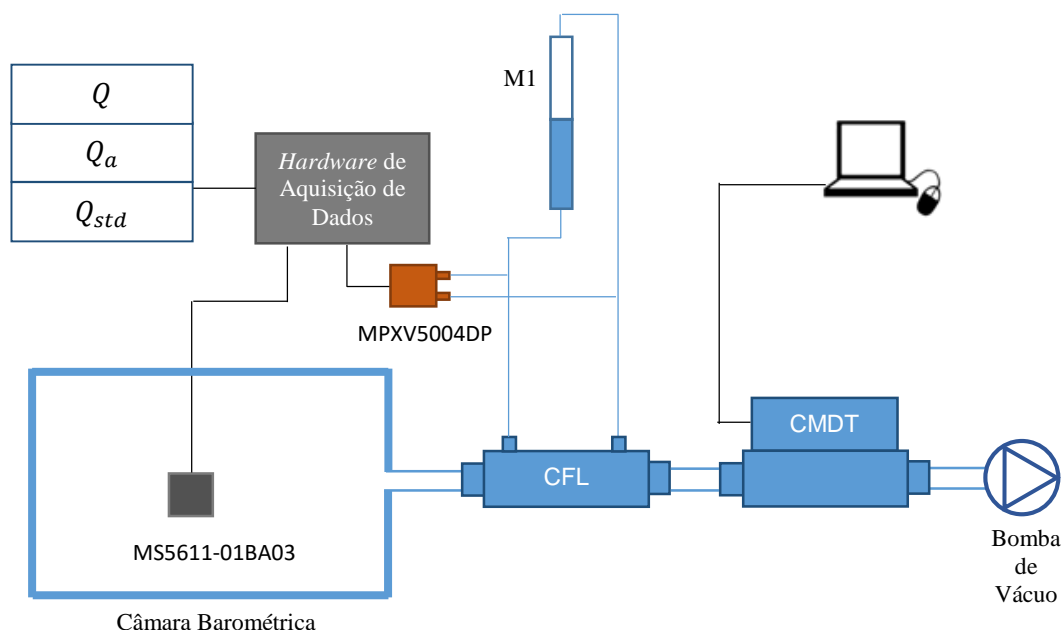


Figura 5. 18 – Esquema Simplificado da Integração do Novo Sistema de Instrumentação no BE

A montagem em paralelo das linhas de pressão estática entre o sensor *MPXV5004DP* e o manómetro de coluna de água M1 foi realizada por intermédio de Ts, um destes Ts é ilustrado na figura 5.19.



Figura 5. 19 – T

O sistema desenvolvido recolhe o *input* de pressão diferencial Δp que ocorre entre as duas tomadas de pressão do CFL e a partir dele processa o cálculo em tempo

real do caudal não corrigido Q . Simultaneamente, este recolhe os *inputs* de pressão absoluta p e temperatura T no interior da câmara barométrica e procede às correções de caudal necessárias. A partir das leituras de temperatura, procede à correção do caudal face às variações da viscosidade, função da temperatura, apresentando o caudal no formato atual Q_a e a partir das leituras de pressão absoluta e temperatura procede à correção de caudal face às oscilações destas grandezas, apresentando-o também no formato *standard* Q_{std} .



Figura 5. 20 – Integração da Solução de Instrumentação no BE

Desta forma, este sistema fornece os três formatos de caudal, sendo possível comparar as suas leituras com as dos outros sistemas. O painel frontal, janela de interface com o utilizador *LabVIEW*, permite a visualização das leituras das grandezas em formato digital, bem como na forma de gráficos em tempo real. As grandezas nele apresentadas são: pressão absoluta p ; temperatura T ; pressão diferencial Δp ; altitude geopotencial $h(p)$; caudal volumétrico não corrigido Q ; caudal volumétrico atual Q_a ; caudal volumétrico *standard* Q_{std} .

A imagem 5.20 ilustra a solução de instrumentação integrada no banco de ensaio de reguladores de oxigénio.

6. Cálculo de Incertezas de Medição

Como forma de validar a solução de instrumentação desenvolvida, foram executadas calibrações ao equipamento utilizado. A principal finalidade destas calibrações foi definir a incerteza de medição de caudal associada ao equipamento desenvolvido. Desta forma, seria possível analisar a viabilidade de utilização deste equipamento no BE de RO.

Antes de se efetuar uma calibração é importante conhecer-se os parâmetros, procedimentos e princípios envolvidos.

6.1 Princípio da Avaliação da Incerteza de Medição

Quando se relata um resultado de medição de uma grandeza física é de interesse comum associar-lhe uma indicação qualitativa. Sendo que só dessa forma é possível analisá-lo quanto à sua fiabilidade. Sem esta indicação dois resultados não podem ser comparados devidamente. Torna-se, portanto, necessário a existência de um procedimento comum e simplificado para a caracterização da qualidade de um resultado obtido, ou seja, para avaliar e expressar a sua incerteza de medição [27].

Do reconhecimento dessa necessidade foi criado o GUM (*Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*). Este documento permite uma avaliação pormenorizada da incerteza associada à calibração de instrumentos de medição.

A incerteza de medição pode ser definida como sendo o parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a uma mensuranda, com base nas informações utilizadas. Sendo que a mensuranda se trata da grandeza que se pretende medir [28].

O objetivo de uma medição é determinar o valor da mensuranda. A medição, propriamente dita, começa com a especificação apropriada da mensuranda, o método de medição e o procedimento de medição [1].

Em geral, o resultado da medição é apenas uma aproximação ou estimativa do valor da mensuranda, sendo assim este resultado só está completo quando acompanhado de uma declaração da incerteza dessa estimativa [1].

O erro de medição, ε , é obtido através da diferença entre o valor medido, V_M , e o valor real, V_R , como descrito na equação 6.1.

$$\varepsilon = V_M - V_R \quad \text{Equação 6.1}$$

Para o erro de medição, contribuem dois tipos de erros [28]:

- Erro sistemático: Componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de forma previsível. Um valor de referência para um erro sistemático é um valor verdadeiro, ou um valor medido dum padrão com incerteza de medição desprezável, ou um valor convencional. As causas deste erro podem ser conhecidas ou desconhecidas, caso estas sejam conhecidas pode aplicar-se uma correção para compensar o erro.

- Erro aleatório: componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de forma imprevisível. O valor de referência para um erro aleatório é a medida que resultaria de um número infinito de medições repetidas da mesma mensuranda. Os erros aleatórios de um conjunto de medições repetidas formam uma distribuição que pode ser resumida pela sua esperança matemática ou valor esperado, o qual é geralmente assumido como sendo zero, e pela sua variância.

Incerteza de Medição

Como já foi referido, a incerteza de medição trata-se do parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a uma mensuranda.

A incerteza caracteriza o grau de confiança associada à medição da mensuranda, ou seja, quanto menor o valor da incerteza mais credível é o resultado obtido na medição.

Para a avaliação e estimativa de uma medição é geralmente usado o procedimento descrito no GUM. Este descreve os seguintes passos [27]:

1. Expressar matematicamente a relação de dependência entre a mensuranda Y e as grandezas de entrada X_i ;
2. Listar todos os componentes de incerteza;
3. Avaliar o tipo de incerteza (Tipo A ou Tipo B);
4. Calcular a incerteza-padrão para cada componente da incerteza;
5. Calcular os respetivos coeficientes de sensibilidade;
6. Avaliar a necessidade de cálculo das covariâncias;
7. Calcular a incerteza combinada;
8. Calcular o fator de expansão k ;
9. Determinar a incerteza expandida.

Numa calibração é comum trabalhar-se com uma única mensuranda ou grandeza de saída Y , esta depende de um determinado número de grandezas de entrada X_i onde $i = 1, 2, 3, \dots, N$, a relação entre estas grandezas é expressa na equação 6.2:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \text{Equação 6.2}$$

Todas as grandezas de entrada têm um valor de incerteza associado. Estas incertezas podem ser determinadas diretamente na medição, como avaliações baseadas na experiência e correções às indicações de instrumentos, ou decorrem de origens externas à medição, como as grandezas associadas aos padrões de medição calibrados.

Avaliação de Medição de Estimativas das Grandezas de Entrada

A incerteza de medição é influenciada por várias grandezas de entrada. Estas podem e devem ser avaliadas através de duas categorias distintas Tipo A e Tipo B.

A primeira é feita a partir da distribuição estatística dos valores da grandeza em séries de medições e pode ser caracterizada por desvios padrão. A segunda pode também ser caracterizada por desvios padrão estimados a partir de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou noutras informações.

Avaliação de Tipo A da Incerteza-Padrão

O método de avaliação de Tipo A da incerteza padrão é obtido através de uma análise estatística de uma série de observações da grandeza medida, sob condições específicas de medição [28].

A análise estatística é efetuada através do desvio padrão experimental da média de uma série de observações decorrente do cálculo da média ou análise de uma regressão matemática.

Este tipo de avaliação pode ser aplicada quando várias observações independentes tenham sido efetuadas para uma grandeza de entrada, nas mesmas condições de medição [29].

A grandeza de entrada X_i , repetidamente medida, é assumida como a grandeza Q_0 . Quando n observações ($n > 1$) são estatisticamente independentes, a estimativa da grandeza Q_0 é \bar{q} , que se trata da média aritmética dos valores individualmente observados q_j ($j = 1, 2, \dots, n$) (Equação 6.3) [1].

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad \text{Equação 6.3}$$

A variância experimental dos valores q_j trata-se de uma estimativa da variância da correspondente distribuição de probabilidade, esta é dada pela equação 6.4. A raiz quadrada positiva desta variância é designada desvio-padrão experimental.

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad \text{Equação 6.4}$$

A melhor estimativa da variância da média \bar{q} é obtida pela variância experimental da média apresentada na equação 6.5.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad \text{Equação 6.5}$$

A incerteza-padrão $u(\bar{q})$ da estimativa da grandeza \bar{q} é o desvio padrão experimental da média, como se traduz na equação 6.6 [1].

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad \text{Equação 6.6}$$

Avaliação de Tipo B da Incerteza-padrão

A avaliação de Tipo B da incerteza-padrão é o método de avaliação da incerteza que não utiliza análise estatística de uma série de observações.

Este método de avaliação baseia-se numa análise científica, que assenta em todos os elementos disponíveis sobre uma possível variabilidade das grandezas de entrada. Entre eles tem-se [27]:

- Dados de medições prévias;
- Experiência de/ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes;

- Especificações de fabricantes;
- Dados provenientes de calibração e outros certificados;
- Incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais.

O uso adequado da informação disponível para uma avaliação de Tipo B exige discernimento baseado na experiência e conhecimento específico. É um saber que pode ser aprendido com a prática.

No caso de só haver conhecimento de um valor para a grandeza X_i , este deve ser utilizado como valor estimado x_i . A sua incerteza padrão $u(x_i)$ deve ser adotada quando fornecida. De outra forma, deve ser calculada a partir de dados inequívocos da incerteza.

Se for possível assumir uma distribuição de probabilidade, para a grandeza X_i , o seu valor esperado deve ser utilizado como a estimativa de x_i e a raiz quadrada da variância da distribuição como incerteza-padrão associada $u(x_i)$.

As distribuições de probabilidade são modelos que representam o estado de conhecimento das grandezas de entrada X_i , as mais utilizadas são [1]:

- **Distribuição Retangular ou Uniforme**

Este tipo de distribuição, ilustrado na figura 6.1, deve ser utilizado quando só é possível estimar os valores limites superior e inferior a_+ e a_- da grandeza X_i e não há conhecimento específico sobre os valores dentro do intervalo. Nesta distribuição supõe-se que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer lugar dentro do intervalo, sendo que a densidade de probabilidade é constante entre os limites.

O valor esperado de X_i é o ponto médio no intervalo x_i , obtido pela equação 6.7:

$$x_i = \frac{a_- + a_+}{2} \quad \text{Equação 6.7}$$

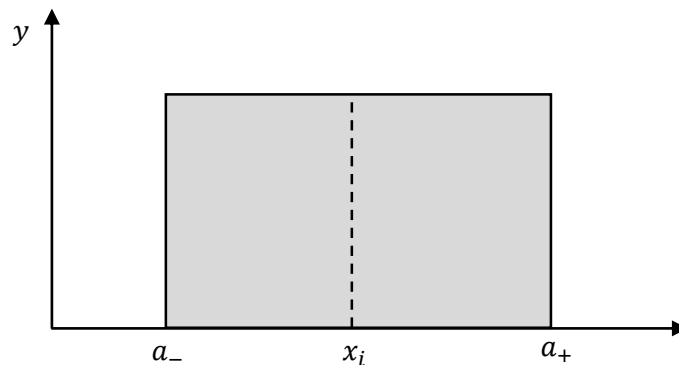


Figura 6. 1 – Distribuição Retangular

Sendo que a sua variância associada é o resultado da equação 6.8:

$$u^2(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} \quad \text{Equação 6.8}$$

Se a diferença entre os limites, a_+ e a_- , for $2a$, então a equação 6.8 toma a forma dada pela equação 6.9:

$$u^2(x_i) = \frac{a^2}{3}$$

Equação 6.9

- **Distribuição Triangular**

Se existirem premissas semelhantes às apresentadas na distribuição retangular e caso seja conhecido *à priori* que os valores centrais da grandeza são mais prováveis que os valores limite, é aconselhável a utilização de uma distribuição triangular (figura 6.2). A incerteza padrão referente a esta distribuição é definida pela equação 6.10, sendo que $2a$ corresponde à largura do intervalo de valores.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

Equação 6.10

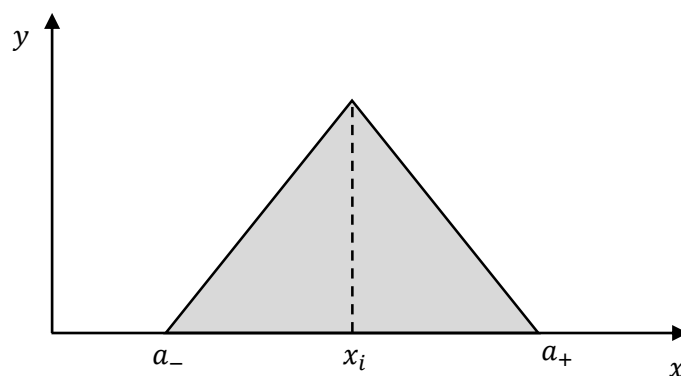


Figura 6. 2 – Distribuição Triangular

- **Distribuição Normal ou Gaussiana**

Este tipo de distribuição de probabilidade, ilustrado na figura 6.3, é o tipo de distribuição geralmente utilizado na avaliação de incerteza de medição do Tipo A. No entanto, perante uma avaliação de incerteza de medição do Tipo B esta deve ser utilizada quando a estimativa x_i é retirada de certificados de calibração, especificações de fabricantes ou de outras incertezas padrão. A incerteza-padrão pode ser calculada efetuando a divisão do valor de incerteza apresentada a pelo fator de expansão, k , como apresentado na equação 6.11.

$$u(x_i) = \frac{a}{k}$$

Equação 6.11

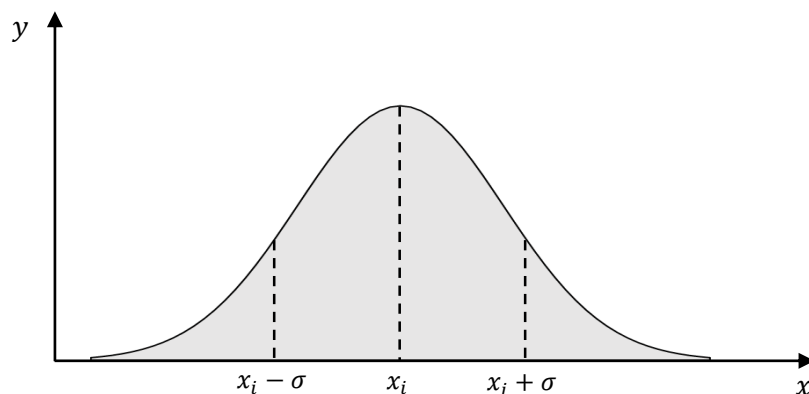


Figura 6. 3 – Distribuição Normal

No gráfico da figura 6.3, x_i trata-se do valor esperado de X_i , que neste caso é igual à média aritmética dos valores obtidos μ , e σ trata-se do desvio padrão da média.

Incerteza-Padrão da Mensurada (Grandeza de Saída)

A determinação da incerteza-padrão da mensurada depende do tipo de grandezas de entrada X_i . Estas podem ser ou não dependentes entre si e este fator deve ser tido em conta.

Se todas as grandezas de entrada forem independentes entre si, o quadrado da incerteza-padrão associado à estimativa da grandeza de saída y é dado pela equação 6.12 [27]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad \text{Equação 6.12}$$

Sendo que y é a estimativa da mensurada Y e $u_i(y)$, obtida pela equação 6.13, se trata da contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de saída y , resultado da incerteza-padrão associada à estimativa de grandeza de entrada.

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \quad \text{Equação 6.13}$$

Onde c_i representa o coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza de entrada x_i , ou seja, a derivada parcial da função modelo f em relação a X_i , avaliada nas estimativas x_i da grandeza de entrada (equação 6.14).

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{Equação 6.14}$$

Caso as grandezas de entrada forem correlacionadas a expressão da equação 6.15 deve ser adotada.

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N c_i c_k u(x_i, x_k) + \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N (1/2 c_{ik}^2 + c_i c_{ikk}) u^2(x_i) u^2(x_k) \quad \text{Equação 6.15}$$

Incerteza de Medição Expandida

Todos os laboratórios de calibração acreditados pelos Organismos de Acreditação da EA (*European Co-operation for Accreditation*) utilizam a incerteza de medição expandida U . Esta é obtida mediante a multiplicação da incerteza padrão $u(y)$, da estimativa da grandeza de saída, por um fator de expansão k , como apresentado na equação 6.16 [27].

$$U = k \cdot u(y) \quad \text{Equação 6.16}$$

O fator de expansão k é escolhido com base no nível de confiança requerido para o intervalo de valores entre $y - U$ a $y + U$. Em geral k está entre 2 e 3. Mas pode assumir outros valores em aplicações especiais. O procedimento adequado para o

cálculo do fator de expansão k consiste no cálculo de graus de liberdade efetivos da incerteza-padrão.

A determinação de graus de liberdade efetivos v_{ef} da incerteza-padrão $u(y)$ associada à estimativa da grandeza de saída pode ser obtida através da equação de Welch-Satterthwaite, equação 6.17.

$$v_{ef} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad \text{Equação 6.17}$$

Onde as estimativas de entrada x_i são assumidas como estaticamente e mutuamente independentes e v_i se trata do número de graus de liberdade efetivos do componente da incerteza padrão $u_i(y)$.

Para uma dada incerteza-padrão obtida através de uma avaliação de Tipo A o número de graus de liberdade efetivos é dado pela equação 6.18. No caso de a avaliação ser do Tipo B torna-se mais problemático associar-lhe graus de liberdade, sendo comum efetuar uma avaliação de forma a garantir que não foi feita nenhuma subestimação. Quando se recorre ao uso de uma distribuição retangular, o número de graus de liberdade da incerteza-padrão, numa avaliação de Tipo B, pode ser considerado como $v_i \rightarrow \infty$

$$v_i = n - 1 \quad \text{Equação 6.18}$$

Após o cálculo do número de graus de liberdade efetivos recorre-se à tabela 6.1 para a obtenção do fator de expansão k . Esta está baseada numa distribuição t – *student* avaliada para uma probabilidade de expansão igual a 95,45%. Caso o v_{ef} calculado não for inteiro o seu valor deve ser truncado para o inteiro imediatamente inferior.

Tabela 6. 1 – Relação Entre Fator de Expansão k e Graus de Liberdade Efetivos v_{ef}

| v_{ef} | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 20 | 50 | ∞ |
|----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----------|
| k | 13,97 | 4,53 | 3,31 | 2,87 | 2,65 | 2,52 | 2,43 | 2,37 | 2,32 | 2,28 | 2,13 | 2,05 | 2,00 |

Nos certificados de calibração de equipamentos de medição, o resultado completo da medição consiste na estimativa y da mensuranda e na incerteza expandida U , como apresentado na equação 6.19.

$$Y = y \pm U \quad \text{Equação 6.19}$$

6.2 Modelo de Simulação de Incertezas

Antes de realizar qualquer calibração, optou-se por executar uma simulação, de forma a prever qual seria o erro de caudal medido pelo equipamento desenvolvido, tomando como premissas as incertezas de medição fornecidas pelos manuais de fabricantes de cada MEMS utilizado.

Para o efeito executou-se uma simulação de carácter aleatório, com base no Modelo de Monte Carlo, isto por não ser possível a adoção de métodos analíticos. A simulação foi realizada utilizando o *software Matlab*.

Nesta simulação foram gerados valores aleatórios para as variáveis de entrada ($p, T, \Delta p$) e seus respetivos erros ($u_T, u_p, u_{\Delta p}$), dentro das suas gamas estabelecidas, e posteriormente, calculados valores das variáveis de saída (Q_a, Q_{std}) e também seus respetivos erros ($u_{Q_a}, u_{Q_{std}}$). Esta simulação teve como objetivo quantificar o erro máximo de leitura que este equipamento pode apresentar, nas condições para as quais se prevê a sua utilização.

Assumindo uma sala não climatizada, foram consideradas as seguintes gamas para os valores de entrada:

$$p = [11597, 102000] \text{ Pa}$$

$$T = [263,15; 313,15] \text{ K } ([-10, 40]^\circ \text{C})$$

$$\Delta p = [0, 10] \text{ polH2O}$$

De acordo com as fichas de dados dos MEMS foram estabelecidas as seguintes gamas de valores para os erros associados às variáveis de entrada:

$$u_T = [-0,8; +0,8]^\circ \text{C}$$

$$u_p = [-2,5; +2,5] \text{ mbar}$$

$$u_{\Delta p} = \begin{cases} [-0,18; +0,18] \text{ polH2O} & \text{se } \Delta p < 3,94 \text{ polH2O} \\ [-0,30; +0,30] \text{ polH2O} & \text{se } \Delta p \geq 3,94 \text{ polH2O} \end{cases}$$

Na geração dos valores das variáveis de entrada e respetivos erros utilizou-se a função *rand* do *Matlab*. Esta função utiliza a distribuição retangular na geração do valor aleatório dentro da sua gama estabelecida.

Na realização de cada simulação são obtidos, no formato de vetor, os valores tomados pelas três variáveis de entrada e respetivos erros, para os quais os erros das variáveis de saída são máximos. Os valores de erro máximo foram obtidos numa simulação, na qual se utilizaram dez milhões de iterações (ou valores aleatórios).

No entanto, por análise da tendência das variáveis ao longo de cada simulação, concluiu-se que os valores máximos do erro de cada variável de saída são obtidos quando os valores de entrada e respetivos erros tomam valores limite das suas gamas.

Na tabela 6.2 são apresentadas duas simulações que tendem a maximizar o erro de caudal volumétrico atual. Nestas são indicados os valores das variáveis de entrada e respetivos erros obtidos em cada simulação, juntamente com o valor da variável de saída e respetivo erro.

Tabela 6. 2 – Simulações que Maximizam o Erro de Caudal Volumétrico Atual

| i | Δp (polH2O) | $u_{\Delta p}$ (polH2O) | T (K) | u_T (K) | Q_a (l/min) | u_{Q_a} (% fs) |
|------|------------------------|----------------------------|------------|--------------|------------------|---------------------|
| 10 M | 3,96 | -0,299 | 265,45 | 0,791 | 72,633 | 3,559 |
| * | 3,94 | -0,300 | 263,15 | 0,800 | 72,782 | 3,598 |

* Os valores de entrada e respetivos erros foram fixados

Onde:

i – número de iterações (ou número de valores aleatórios gerados)

Na tabela 6.3 são apresentadas outras duas simulações que tendem a maximizar o valor do erro de caudal volumétrico *standard*.

Tabela 6. 3 – Simulações que Maximizam o Erro de Caudal Volumétrico Standard

| i | Δp (polH2O) | $u_{\Delta p}$ (polH2O) | T (K) | u_T (K) | p (Pa) | u_p (Pa) | Q_{std} (ls/min) | $u_{Q_{std}}$ (% fs) |
|------|------------------------|----------------------------|------------|--------------|-------------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| 10 M | 6,14 | 0,297 | 263,32 | -0,608 | 101730 | 173,68 | 120,301 | 3,984 |
| * | 3,94 | 0,300 | 263,15 | -0,800 | 102000 | 250,00 | 80,235 | 4,265 |

* Os valores de entrada e respetivos erros foram fixados

Nesta simulação foram tidos em conta dois tipos de caudal: caudal volumétrico atual Q_a e caudal volumétrico *standard* Q_{std} . Chega-se então à conclusão de que os erros associados às duas grandezas de caudal são maximizados nas condições mencionadas nas últimas linhas das tabelas 6.2 e 6.3.

Os valores máximos que o erro de caudal volumétrico atual e o erro de caudal volumétrico *standard* podem tomar, às condições para as quais se prevê a utilização do equipamento desenvolvido, são:

$$u_{Q_a} \approx \pm 3,6\% fs$$

$$u_{Q_{std}} \approx \pm 4,3\% fs$$

Sendo que o fim de escala de caudal atual e caudal *standard* assumem os valores de 150 l/min e 150 ls/min respetivamente.

Tendo em conta que os requisitos mínimos de precisão estabelecidos para o caudalímetro a utilizar neste BE é de $\pm 1,0\%$ leitura, é possível concluir que, segundo esta primeira análise, o sistema não apresenta precisão suficiente para ser utilizado para a finalidade a que se destina.

No entanto a análise realizada é de natureza pessimista, visto que tem em conta as incertezas de medição especificadas nas fichas de dados de cada um dos MEMS. Normalmente os fabricantes indicam as características de precisão de instrumentos de medida. Estas características geralmente baseiam-se nos piores resultados possíveis, sabendo à partida que os respetivos instrumentos na prática apresentarão melhores resultados que os indicados. Os MEMS utilizados no estudo não tiveram calibração de fábrica, assim eles precisam de ser calibrados individualmente, calibrações que foram efetuadas e serão aprofundadas no próximo subcapítulo.

6.3 Calibração do Sistema de Instrumentação

Neste capítulo são descritas as calibrações efetuadas aos sensores constituintes do sistema de instrumentação desenvolvido, bem como a calibração efetuada ao próprio sistema. Todas as calibrações foram efetuadas de acordo com o GUM.

Padrões de Trabalho Utilizados

Foram utilizados dois padrões nas calibrações efetuadas, eles são propriedade da OGMA e são descritos em seguida:

Calibrador de Pressão *Ruska 7750i* com Sistema de Bomba de Vácuo

Este sistema ADTS (*Air Data Test Set*) de última geração, incorporado com um único sensor *quartz*, apresenta uma precisão de 0,005% da leitura (dos 25% aos 100% de escala) ou 0,005% de 25% do fim de escala (abaixo dos 25% de escala). Garante uma estabilidade de longa duração de 3 meses. Sendo ideal para a calibração de uma vasta gama de instrumentação aviônica, como por exemplo: altímetros, indicadores de velocidade do ar, entre outros [31]. A figura 6.4 ilustra este equipamento.

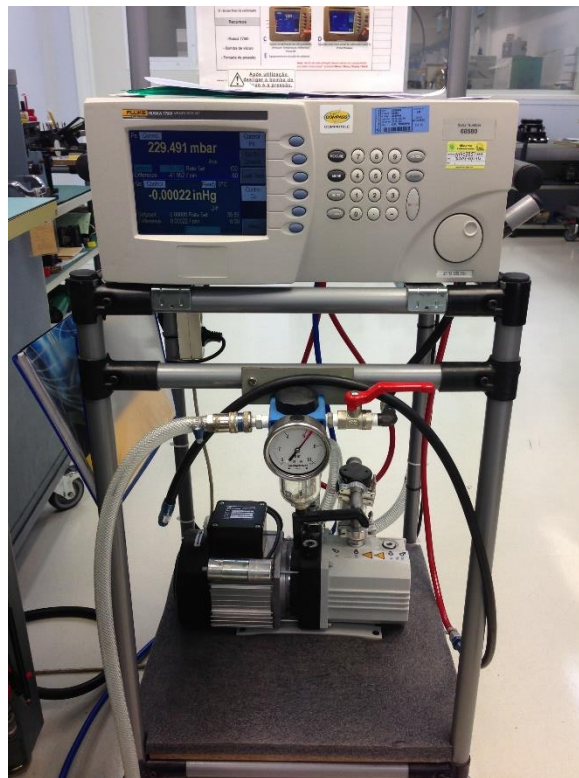


Figura 6. 4 – *Ruska 7750i*

CMDT Modelo *Red-y-Smart* da *Vögtlin Instruments*

Este modelo de CMDT trata-se do modelo instalado no BE de RO (CMDT1), cujas características já foram apresentadas no subcapítulo 4.4, nomeadamente na tabela 4.1. Este modelo foi utilizado como padrão por apresentar uma ótima precisão (0,3% fs) face à precisão requerida pelo manual técnico do BE (1% fs).

Calibração do Sensor de Pressão Absoluta

Para a calibração da pressão absoluta, variável devolvida pelo sensor *MS5611-01BA03*, utilizou-se o calibrador de pressão *Ruska 7750i* com sistema de bomba de vácuo juntamente com uma câmara barométrica de baixa pressão.

A montagem utilizada na calibração do sensor de pressão *MS5611-01BA03* está ilustrada na figura 6.5. Nesta montagem o sensor foi colocado no interior da câmara barométrica de baixa pressão que por sua vez estava ligada à bomba de vácuo do sistema do calibrador. A comunicação entre o sensor e o *Arduino*, do interior para o exterior da câmara barométrica, é feita por intermédio de uma placa de comunicação estanque, na qual são ligados os cabos de comunicação de um lado e de outro (figura 6.6). Para a ligação dos cabos foi necessário recorrer-se a soldaduras.

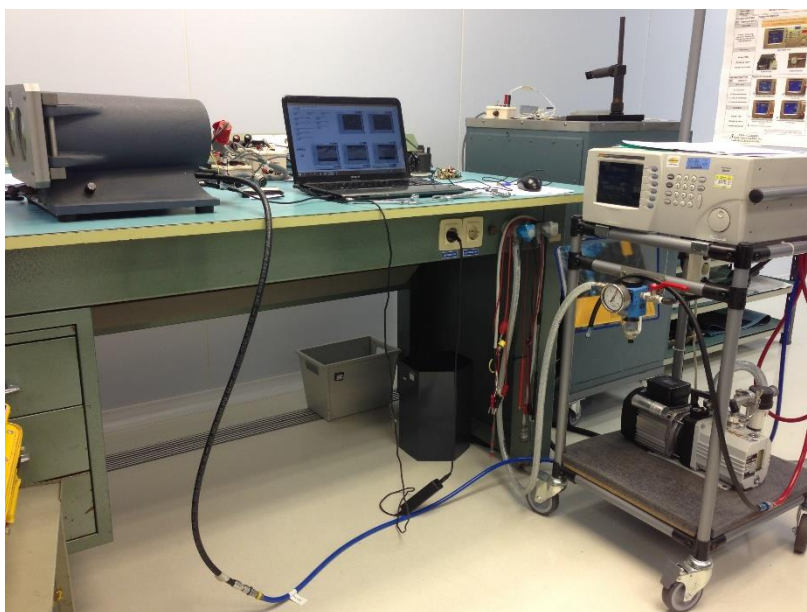


Figura 6. 5 – Montagem Utilizada na Calibração do Sensor *MS5611-01BA03*

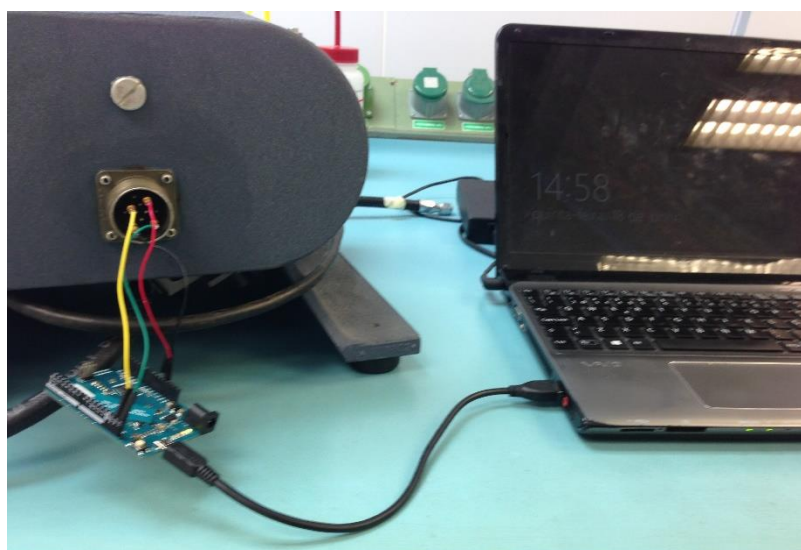


Figura 6. 6 – Ligação do *Arduino* ao Interior da Câmara Barométrica

Os resultados obtidos no ensaio de calibração da medição de pressão são apresentados na tabela 6.4.

Tabela 6. 4 – Ensaio de Calibração ao Sensor de Pressão

| Referência [mbar] | Avanço [mbar] | Retorno [mbar] | Avanço [mbar] | Retorno [mbar] |
|----------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 1013,25 | 1013,25 | 1013,15 | 1013,2 | 1013,13 |
| 696,817 | 696,42 | 696,29 | 696,3 | 696,25 |
| 465,633 | 464,52 | 464,51 | 464,5 | 464,43 |
| 300,896 | 299,27 | 299,17 | 299,17 | 299,09 |
| 187,539 | 185,52 | 185,48 | 185,37 | 185,35 |
| 155,972 | 113,7 | 113,69 | 113,61 | 113,62 |

As pressões de ensaio, forçadas pelo calibrador no interior da câmara de baixa pressão (primeira coluna da tabela 6.4), dizem respeito às altitudes geopotenciais de 0, 10, 20, 30, 40 e 50 mil pés, respetivamente.

Para a calibração da variável pressão absoluta foram assumidas como fontes de incerteza os seguintes parâmetros:

- Repetibilidade
- Resolução do Padrão
- Resolução do Sensor
- Incerteza do Padrão
- Histerese

A tabela 6.5 trata-se de uma das tabelas de cálculo da incerteza de medição. Esta corresponde ao cálculo de incerteza de medição aos 1013,250 milibar de pressão.

Foi executada uma tabela semelhante a esta para cada um dos seis patamares de pressão absoluta considerados.

Tabela 6. 5 – Cálculo de Incerteza de Medição Associada à Pressão

| Componente | Quantidade Estimada | Incerteza Padrão | Distribuição (Probabilidade) | | Coeficiente de Sensibilidade | Incerteza padrão (Contribuição) | Graus de Liberdade |
|---------------------|---------------------|------------------|------------------------------|------|------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| X_i | x_i | $u(x_i)$ | Tipo | K | c_i | $u_i(y) = c_i \cdot u(x_i)$ | |
| Repetibilidade | 0,053774219 | 0,02688711 | A | 4 | 1 | 2,69E-02 | 3 |
| Resolução do Padrão | 0,0005 | 0,000288675 | B-R | | 1 | 2,89E-04 | 50 |
| Resolução do Sensor | 0,005 | 0,002886751 | B-R | | 1 | 2,89E-03 | 50 |
| Padrão | 0,132831608 | 0,066415804 | B-N | 2 | 1 | 6,64E-02 | 500 |
| Histerese | 0,0425 | 0,024537386 | B-R | | 1 | 2,45E-02 | 50 |
| Variância | | | | | | 0,0057 | |
| Incerteza padrão | | | | | | 0,075 | 142,502319 |
| Incerteza expandida | | | k= | 2,02 | | 0,16 | |

O máximo valor de incerteza de medição foi obtido à pressão de 1013,250 milibar e o seu valor foi de $\pm 0,16 \text{ mbar}$.

Calibração do Sensor de Pressão Diferencial

Para a calibração da pressão diferencial utilizou-se também o calibrador de pressão *Ruska 7750i* com a bomba de vácuo associada. A montagem desta calibração está ilustrada na figura 6.7, na qual se ligou a tomada de pressão negativa do MEMS *MPXV5004DP* à linha de vácuo do sistema de calibração.

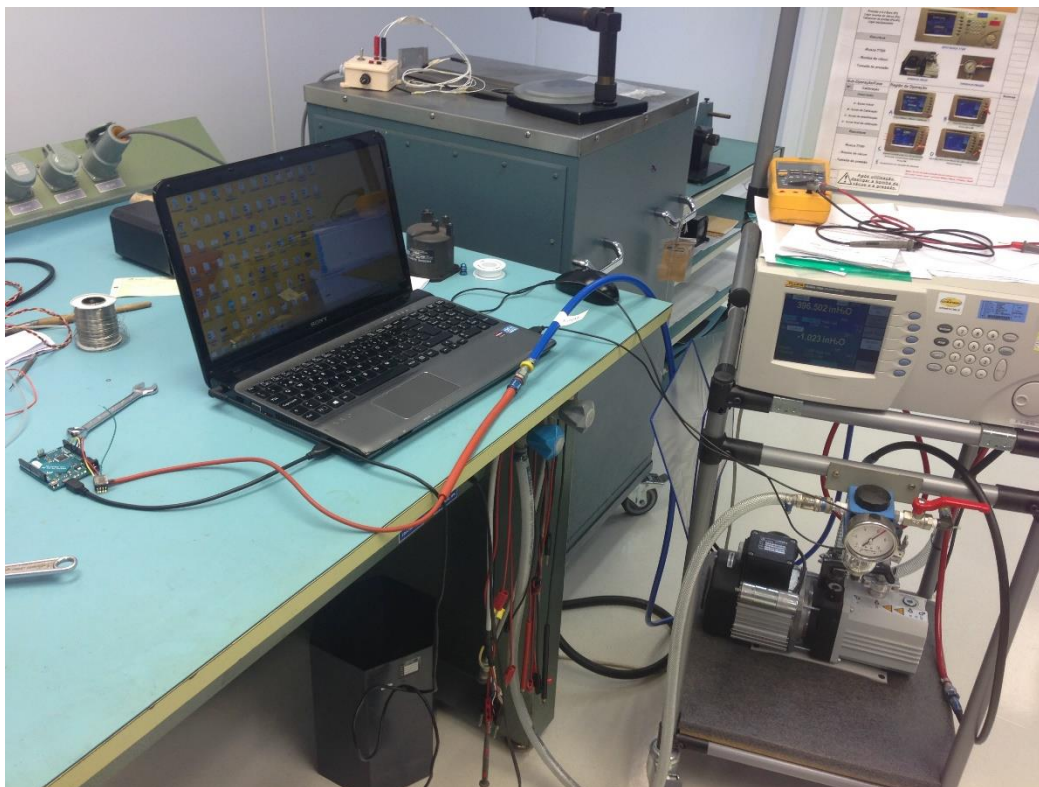


Figura 6. 7 – Montagem Efetuada para a Calibração do Sensor *MPXV500DP*

O ensaio realizado nesta calibração está apresentado na tabela 6.6.

Tabela 6. 6 – Ensaio de Calibração ao Sensor de Pressão Diferencial

| Referência [inH2O] | Avanço [inH2O] | Retorno [inH2O] | Avanço [inH2O] | Retorno [inH2O] | Avanço [inH2O] | Retorno [inH2O] |
|-----------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| 1,000 | 0,98 | 0,97 | 0,97 | 0,96 | 0,96 | 0,95 |
| 5,000 | 4,97 | 4,95 | 4,93 | 4,92 | 4,92 | 4,92 |
| 10,000 | 9,96 | 9,96 | 9,92 | 9,91 | 9,91 | 9,91 |
| 14,000 | 13,92 | 13,92 | 13,9 | 13,9 | 13,9 | 13,9 |

Para esta calibração foram assumidas como fontes de incerteza as mesmas utilizadas para a calibração anterior:

- Repetibilidade
- Resolução do Padrão
- Resolução do Sensor
- Incerteza do Padrão
- Histerese

A tabela 6.7 trata-se de uma das tabelas de cálculo da incerteza de medição associada ao diferencial de pressão, esta corresponde ao cálculo de incerteza de medição às 5 polegadas de água de diferencial de pressão.

Foi executada uma tabela semelhante a esta para cada um dos quatro valores de pressões diferencial considerados nesta calibração.

Tabela 6. 7 – Cálculo de Incerteza de Medição Associada ao Diferencial de Pressão

| Componente | Quantidade Estimada | Incerteza Padrão | Distribuição (Probabilidade) | | Coeficiente de Sensibilidade | Incerteza padrão (Contribuição) | Graus de Liberdade |
|---------------------|---------------------|------------------|------------------------------|------|------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| X_i | x_i | $u(x_i)$ | Tipo | K | c_i | $u_i(y)=c_i*u(x_i)$ | |
| Repetibilidade | 0,020736441 | 0,008465617 | A | 6 | 1 | 0,008465617 | 5 |
| Resolução do Padrão | 0,0005 | 0,000288675 | B-R | | 1 | 0,000288675 | 50 |
| Resolução do Sensor | 0,005 | 0,002886751 | B-R | | 1 | 0,002886751 | 50 |
| Padrão | 0,016769085 | 0,008384543 | B-N | 2 | 1 | 0,008384543 | 500 |
| Histerese | 0,005 | 0,002886751 | B-R | | 1 | 0,002886751 | 50 |
| Variância | | | | | | 0,0002 | |
| Incerteza padrão | | | | | | 0,014 | 14,19371 |
| Incerteza expandida | | | k= | 2,20 | | 0,04 | |

O máximo valor de incerteza de medição foi obtido aos diferenciais de pressão de 5 e 10 *inH2O* e o seu valor foi de $\pm 0,04$ *inH2O*.

Calibração do Sistema Final

O padrão utilizado na calibração do sistema de instrumentação desenvolvido foi o CMDT modelo *Red-y-Smart* da *Vögtlin Instruments*. A montagem efetuada nesta calibração foi a já apresentada, de uma forma simplista, no subcapítulo 5.4, nomeadamente na figura 5.18.

Nesta calibração foram efetuados 3 ensaios:

- Ensaio ao Nível do Mar

Tabela 6. 8 – Ensaio de Calibração ao Sistema de Medição de Caudal (0 kft)

| Referência [ls/min] | Avanço [ls/min] | Retorno [ls/min] | Avanço [ls/min] | Retorno [ls/min] |
|------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 5,953 | 5,50 | 5,80 | 5,80 | 5,80 |
| 50,050 | 49,60 | 49,50 | 49,70 | 49,70 |
| 95,975 | 96,20 | 96,50 | 96,30 | 96,80 |
| 137,850 | 138,00 | 138,00 | 138,70 | 138,70 |

- Ensaio a 30 mil pés de altitude

Tabela 6. 9 – Ensaio de Calibração ao Sistema de Medição de Caudal (30 kft)

| Referência [ls/min] | Avanço [ls/min] | Retorno [ls/min] | Avanço [ls/min] | Retorno [ls/min] |
|------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 1,830 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 |
| 15,250 | 14,5 | 14,5 | 14,7 | 14,7 |
| 30,125 | 28,3 | 28,1 | 28,4 | 28,4 |
| 43,750 | 40,7 | 40,7 | 40,9 | 40,9 |

- Ensaio a 50 mil pés de altitude

Tabela 6. 10 – Ensaio de Calibração ao Sistema de Medição de Caudal (50 kft)

| Referência [ls/min] | Avanço [ls/min] | Retorno [ls/min] | Avanço [ls/min] | Retorno [ls/min] |
|------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 0,000 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| 5,860 | 5,50 | 5,40 | 5,50 | 5,30 |
| 11,300 | 10,80 | 10,50 | 10,80 | 10,60 |
| 15,950 | 15,20 | 15,20 | 15,20 | 15,20 |

Os valores de referência dos ensaios efetuados foram escolhidos em função dos valores indicados na coluna de líquido. Sendo que estes últimos foram os mesmos nos 3 ensaios. Eles foram: 5, 50, 100, 150 litros por minuto. Os valores de caudal *standard* correspondentes são diferentes de ensaio para ensaio, isto porque estes foram realizados a pressão (ou altitude geopotencial) distinta.

Nesta calibração as fontes de incerteza assumidas foram as seguintes:

- Repetibilidade
- Resolução
- Pressão
- Temperatura
- Pressão Diferencial

Sendo que o caudal volumétrico *standard* é função do diferencial de pressão entre as duas tomadas de pressão do caudalímetro, da temperatura e da pressão do fluido, como indica na equação 6.20.

$$Q_{std}(p, T, \Delta p) = [B \times \Delta p + C \times (\Delta p)^2] * \frac{\mu_{std}}{\mu(T)} * \frac{T_{std}}{T} * \frac{p}{p_{std}} \quad \text{Equação 6.20}$$

O contributo destas variáveis para o resultado final deve ser tido em conta.

Os coeficientes de sensibilidade relativamente à pressão, temperatura e pressão diferencial podem ser calculados segundo a norma EA-4/02 da seguinte forma [30]:

i. Coeficiente de Sensibilidade de Pressão

$$c_p = \frac{\partial Q_{std}}{\partial p} \quad \text{Equação 6.21}$$

ii. Coeficiente de Sensibilidade de Temperatura

$$c_T = \frac{\partial Q_{std}}{\partial T} \quad \text{Equação 6.22}$$

iii. Coeficiente de Sensibilidade de Pressão Diferencial

$$c_{\Delta p} = \frac{\partial Q_{std}}{\partial \Delta p} \quad \text{Equação 6.23}$$

O cálculo destes coeficientes de sensibilidade está apresentado no anexo D.

A tabela 6.11 trata-se de uma das tabelas de cálculo da incerteza de medição associada ao caudal, esta corresponde ao cálculo de incerteza de medição aos 138 ls/min no ensaio ao nível do mar.

Foi executada uma tabela semelhante a esta para cada um dos 4 pontos de calibração em cada um dos 3 ensaios

Tabela 6. 11 – Cálculo de Incerteza de Medição Associada ao Caudal

| Componente | Quantidade Estimada | Incerteza Padrão | Distribuição (Probabilidade) | | Coefficiente de Sensibilidade | Incerteza padrão (Contribuição) | Graus de Liberdade |
|---------------------|---------------------|------------------|------------------------------|------|-------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| X_i | x_i | $u(x_i)$ | Tipo | K | c_i | $u_i(y)=c_i*u(x_i)$ | |
| Repetibilidade | 0,404145188 | 0,202072594 | A | 4 | 1 | 0,202072594 | 3 |
| Resolução | 0,005 | 0,002886751 | B-R | | 1 | 0,002886751 | 50 |
| Pressão | 0,16 | 0,079207921 | B-N | 2,02 | 0,135908333 | 0,010765017 | 500 |
| Temperatura | 0,8 | 0,461880215 | B-R | | - 0,001140132 | -0,000526605 | 50 |
| Pressão Diferencial | 0,04 | 0,018181818 | B-N | 2,2 | 12,65792308 | 0,230144056 | 500 |
| Variância | | | | | | 0,0939 | |
| Incerteza padrão | | | | | | 0,306 | 15,6111777 |
| Incerteza expandida | | | k= | 2,18 | | 0,67 | |

A máxima incerteza de medição de caudal foi obtida nestas mesmas condições e o seu valor foi de $\pm 0,67$ litros *standard* por minuto.

7. Análise e Discussão de Resultados

As fichas de calibração obtidas em cada ensaio são apresentadas de seguida e posteriormente será feita uma análise geral dos resultados.

Tabela 7. 1 – Ficha de Calibração do Sensor de Pressão Absoluta

| Sensor de Pressão Absoluta (MS5611-01BA03) | | | |
|--|-------------------------------|------|-------------------|
| Leitura no Padrão [mbar] | Leitura no Equipamento [mbar] | k | Incerteza [±mbar] |
| 1013,250 | 1013,18 | 2,02 | 0,16 |
| 696,817 | 696,32 | 2,07 | 0,15 |
| 465,633 | 464,49 | 2,03 | 0,1 |
| 300,896 | 299,18 | 2,17 | 0,13 |
| 187,539 | 185,43 | 2,52 | 0,13 |
| 155,972 | 113,66 | 2,2 | 0,08 |

Tabela 7. 2 – Ficha de Calibração do Sensor Altimétrico

| Sensor Altimétrico (MS5611-01BA03) | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|------|-----------------|
| Leitura no Padrão [ft] | Leitura no Equipamento [ft] | k | Incerteza [±ft] |
| 10000 | 10019 | 2,37 | 4 |
| 20000 | 20056 | 2,43 | 10 |
| 30000 | 30126 | 2,13 | 4 |
| 40000 | 40160 | 2,52 | 9 |
| 50000 | 49520 | 2,52 | 11 |

Tabela 7. 3 – Ficha de Calibração do Sensor de Pressão Diferencial

| Sensor de Pressão Diferencial (MPXV5004DP) | | | |
|--|--------------------------------|------|--------------------|
| Leitura no Padrão [inH2O] | Leitura no Equipamento [inH2O] | k | Incerteza [±inH2O] |
| 1 | 0,97 | 2,65 | 0,03 |
| 5 | 4,94 | 2,2 | 0,04 |
| 10 | 9,93 | 2,28 | 0,04 |
| 14 | 13,91 | 2,65 | 0,03 |

A calibração do sensor altimétrico foi efetuada só para complementar a calibração de pressão absoluta, visto que estas grandezas se relacionam diretamente.

Tabela 7. 4 – Ficha de Calibração do Sistema de Medição de Caudal (0 kft)

| Sistema Final a 0kft | | | |
|----------------------------|---------------------------------|------|---------------------|
| Leitura no Padrão [ls/min] | Leitura no Equipamento [ls/min] | k | Incerteza [±ls/min] |
| 5,953 | 5,7 | 2,01 | 0,65 |
| 50,05 | 49,6 | 2,01 | 0,59 |
| 95,975 | 96,5 | 2,04 | 0,6 |
| 137,85 | 138,4 | 2,18 | 0,67 |

Tabela 7. 5 – Ficha de Calibração do Sistema de Medição de Caudal (30 kft)

| Sistema Final a 30 kft | | | |
|----------------------------|---------------------------------|------|---------------------|
| Leitura no Padrão [ls/min] | Leitura no Equipamento [ls/min] | k | Incerteza [±ls/min] |
| 1,83 | 1,7 | 2,01 | 0,19 |
| 15,25 | 14,6 | 2,09 | 0,22 |
| 30,125 | 28,3 | 2,21 | 0,23 |
| 43,75 | 40,8 | 2,18 | 0,2 |

Tabela 7. 6 – Ficha de Calibração do Sistema de Medição de Caudal (50 kft)

| Sistema final a 50 kft | | | |
|----------------------------|---------------------------------|------|---------------------|
| Leitura no Padrão [ls/min] | Leitura no Equipamento [ls/min] | k | Incerteza [±ls/min] |
| 0 | 0,6 | 2,01 | 0,08 |
| 5,86 | 5,43 | 2,52 | 0,15 |
| 11,3 | 10,68 | 2,87 | 0,24 |
| 15,95 | 15,2 | 3,31 | 0,1 |

Observando os resultados das calibrações dos sensores de pressão absoluta e de pressão diferencial é notável que os valores obtidos foram significativamente inferiores aos que o fabricante afirma poder vir a ocorrer. A tabela 7.7 ilustra isso mesmo.

Tabela 7. 7 – Especificação do Fabricante vs Cálculo de Incerteza (Pressão)

| | Incerteza máxima segundo o Fabricante | Incerteza máxima obtida na calibração |
|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Pressão | $\pm 2,5$ mbar | $\pm 0,16$ mbar |
| Pressão Diferencial | $\pm 0,30$ polH ₂ O | $\pm 0,040$ polH ₂ O |

Relativamente aos valores de incertezas de medição de caudal, a discrepância entre o valor obtido na simulação de incertezas, efetuada com base nas especificações do fabricante, e a calibração executada internamente é muito significativa. Sendo que para o primeiro caso é de $\pm 4,3\%$ fs e a segunda é de apenas $\pm 0,67$ litros *standard* por minuto o que representa uma incerteza relativa de $\pm 0,45\%$ fs.

Tabela 7. 8 – Especificação do Fabricante vs Cálculo de Incerteza (Caudal)

| | Incerteza máxima segundo o Fabricante | Incerteza máxima de calibração | Requisito de incerteza mínima de medição |
|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|--|
| Caudal Volumétrico Standard | $\pm 4,3\%$ fs | $\pm 0,45\%$ fs | $\pm 1,0\%$ fs |

A incerteza máxima de medição de caudal volumétrico *standard* foi obtida a partir de duas abordagens:

A primeira, tratou-se de um modelo de simulação de incertezas, com base nas especificações dos fabricantes dos MEMS. Esta simulação pode ser considerada uma análise conservadora, pois, normalmente, os valores de incerteza de medição apresentados nas fichas de dados dos MEMS, são superiores aos valores de incerteza que estes na verdade apresentam. Por outras palavras, os fabricantes afirmam que os MEMS são menos precisos do que estes são na realidade. Facto que se verificou na análise dos resultados da calibração interna realizada aos MEMS (tabela 7.7).

A segunda abordagem tratou-se de uma calibração executada ao sistema desenvolvido (conjunto CFL - DAS). Nesta calibração verificou-se que, na prática, o sistema desenvolvido apresenta precisão suficiente para ser utilizado no BE de RO.

Em suma: Segundo uma primeira análise pessimista (simulação de incertezas) a instrumentação não preenche os requisitos mínimos de precisão, mas através de uma calibração executada internamente de acordo com o GUM, provou-se o contrário.

Atendendo a estes resultados, conclui-se que é possível utilizar esta instrumentação no BE de RO. No entanto, dados os resultados obtidos na simulação de incertezas, existe a possibilidade de os MEMS poderem vir a comprometer os resultados obtidos na calibração, caso estes não apresentem uma boa estabilidade a médio/ longo prazo. Dada a curta duração deste projeto, não foi possível efetuar um estudo de

fiabilidade a médio prazo deste instrumento de medição. De qualquer forma, uma possível solução, a fim de garantir que os resultados obtidos na calibração são aplicáveis a médio prazo, seria sujeitar o instrumento de medida a calibrações semelhantes com uma elevada frequência.

8. Conclusão e Trabalhos Futuros

A partir da análise feita à solução intermédia adaptada pela empresa, utilizando CMDT em vez de CFL, concluiu-se que este sistema era incapaz de realizar ensaios acima do nível do mar, isto porque o sistema de CMDT fornece leituras de caudal apenas em formato *standard*, sendo que o protocolo de testes, existente na documentação técnica do BE, considera as leituras em caudal atual.

A prospeção de mercado efetuada permitiu ter conhecimento das alternativas disponíveis para compra, entre elas novos bancos de ensaio e novos sistemas de caudalímetros. Embora as soluções apresentadas permitam resolver o problema ocorrente e algumas delas possam vir a capacitar a empresa na manutenção de uma maior gama de RO, procurou-se encontrar uma solução mais acessível a nível financeiro.

Nesta ótica de contenção de custos, foi proposto o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados que acoplado aos CFL em estado ultrapassado permitiria uma aquisição e devolução de dados em tempo real com as correções de caudal pretendidas.

O projeto de melhoria tecnológica desenvolvido veio oferecer uma solução tecnologicamente mais avançada e com maior precisão que a existente inicialmente a um preço bastante acessível. Comparando o investimento envolvido neste projeto (40 euros) e o que provavelmente a empresa viria a realizar, na aquisição dos caudalímetros inteligentes da CME (5 mil euros), este acaba por permitir uma redução de 99,2 por cento dos custos de investimento.

O sistema desenvolvido permite a visualização das leituras de caudal em tempo real, nos três formatos distintos: caudal não corrigido, caudal atual e caudal *standard* consoante a necessidade do utilizador, fornecendo ainda leituras das grandezas existentes no interior da câmara barométrica, entre elas: temperatura, pressão absoluta e respetiva altitude geopotencial. Todas as leituras fornecidas pelo sistema são complementadas por gráficos em tempo real que permitem uma melhor perceção visual do que está a ocorrer.

Como forma de investigar se o sistema desenvolvido apresentava ou não precisão suficiente para operar no BE de RO foram realizadas duas abordagens: Modelo de simulação de incertezas e calibração ao sistema e aos seus MEMS.

A calibração executada aos MEMS, utilizados no sistema, permitiu concluir que estes têm precisão superior à que o fornecedor indica e apresentam boa estabilidade a curto prazo.

Os resultados obtidos na calibração executada ao sistema final desenvolvido permitem concluir que o sistema apresenta precisão suficiente ($<1\%$ fs) para ser utilizado no BE a que se destina, alcançando os objetivos deste trabalho.

No entanto, os resultados obtidos na simulação de incerteza colocam em questão o nível de estabilidade a médio/ longo prazo do sistema desenvolvido. A duração deste projeto não permitiu um estudo de fiabilidade a médio prazo do sistema desenvolvido. De qualquer forma, uma possível solução, a fim de garantir que os resultados obtidos são aplicáveis a médio prazo, seria sujeitar o instrumento de medida a calibrações semelhantes com uma elevada frequência. A decisão a tomar relativamente a esse aspeto, e de analisar a estabilidade a longo prazo desta solução, ficou nas mãos da OGMA, pois depende da condição específica e da política da empresa e é, portanto, fora do âmbito deste projeto.

Desta forma, fica em aberto um novo estudo de MEMS e placas de aquisição na busca de outras soluções que irão mais tarde ser comparadas com a aqui apresentada.

Bibliografia

- [1] JCGM 100:2008, *Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1ª Ed. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
- [2] T. A. Talay, "Introduction to the Aerodynamics of Flight." National Aeronautics and Space Administration (NASA), Washington, D.C., 1975.
- [3] International Civil Aviation Organization (ICAO), "U.S. Standard Atmosphere." U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1962.
- [4] P. V. Gamboa, "Atmosfera Padrão," *Mecânica de Voo I*. Universidade da Beira Interior (UBI), Covilhã, 2008.
- [5] Federal Aviation Administration (FAA), "Cabin Environmental Control Systems Volume 2 Chapter 16," in *Aviation Maintenance Technician Handbook-Airframe*, Newcastle (Washington): Aviation Supplies and Academics (ASA), 2012.
- [6] Honeywell, "Life Support Systems." Honeywell International Inc., Yeovil (Somerset, UK), 2008.
- [7] United States Air Force (USAF), "Technical Manual - Maintenance Instructions - Oxygen Equipment," no. T.O. 15X-1-1. Department of the Air Force of the United States, 2014.
- [8] F. M. White, *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [9] R. C. Baker, *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications*. New York USA: Cambridge University Press, 2005.
- [10] Omega Engineering, "Flow & Level Measurement Volume 4," in *Transactions in Measurement and Control*, Putman Publishing Company and OMEGA Press LLC, 2001.
- [11] F. L. Pena, A. D. Deibe, M. R. Lema, and S. V. Rodriguez, "A new approach to laminar flowmeters," *Sensors*, vol. 10, no. 12, pp. 10560–10570, 2010.
- [12] T. R. Kuphaldt, *Lessons in Industrial Instrumentation*. 2008.
- [13] J. D. Wright, T. Cobu, R. F. Berg, and M. R. Moldover, "Calibration of laminar

- flow meters for process gases.pdf,” *Flow Meas. Instrum.*, vol. 25, 2012.
- [14] First Sensor, “Mass flow versus volumetric flow.” First Sensor, 2015.
 - [15] OGMA, “About OGMA,” 2015. [Online]. Available: http://www.ogma.pt/index.php?page=corporate_en. [Accessed: 14-Nov-2015].
 - [16] Vögtlin Instruments AG, “Thermal Mass Flow Meters and Controllers for Gases.” Vögtlin Instruments AG, Aesch (Switzerland), 2015.
 - [17] Meriam, “User ’ s Manual Laminar Flow Elements.” Meriam, Cleveland (Ohio), 2015.
 - [18] Carleton Life Support Systems Inc, “SE0230 Support Equipment - Regulator Test Stand.” Davenport (Iowa), 2003.
 - [19] CME, “Model OTS570 Automated Portable Oxygen Components Test Set.” Division of Aerospace Control Products Inc, Davenport (Iowa), 2011.
 - [20] National Instruments (NI), “O que é aquisição de dados?,” 2015. [Online]. Available: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>. [Accessed: 13-Oct-2015].
 - [21] Measurement Specialties, “MS5611-01BA03 Barometric Pressure Sensor , with stainless steel cap,” vol. 4096, no. 1. Measurement Specialties TM, Fremont (California), 2012.
 - [22] Freescale Semiconductor, “Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned , Temperature Compensated and Calibrated.” Freescale Semiconductor Inc, Tempe (Arizona), 2009.
 - [23] Arduino, “Arduino Leonardo,” 2015. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardLeonardo>. [Accessed: 13-Oct-2015].
 - [24] F. Souza, “Arduino Leonardo,” 2014. [Online]. Available: <http://www.embarcados.com.br/arduino-leonardo/>. [Accessed: 16-Nov-2015].
 - [25] J. D. R. Afonso, “Projecto e Avaliação Operacional de uma Estrutura,” Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2010.
 - [26] National Instruments (NI), “Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW,” 2015. [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/pt/>. [Accessed: 16-Nov-2015].

- [27] A. C. Baratto, J. C. Damasceno, J. A. P. Alves, J. T. Filho, P. R. G. Couto, and S. P. de Oliveira, *GUM 2008 - Guia para a expressão de incerteza de medição*, 1ª Ed. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), 2008.
- [28] IPQ, *Vocabulário Internacional de Metrologia*, 1ª Edição . Caparica: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), 2012.
- [29] Instituto Português de Acreditação (IPac), “Avaliação da Incerteza de Medição em Calibração.” Caparica, 2015.
- [30] EA-4/02, *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*. European Co-operation for Accreditation, 1999.
- [31] Fluke Calibration, “RUSKA 7750i Air Data Test Set.” Fluke Corporation, Everett (Washington), 2010.
- [32] M. Cavcar, “The International Standard Atmosphere (ISA),” Anadolu University, Turkey, 2000.
- [33] Airbus, “Getting to Grips with Aircraft Performance.” Airbus S.A.S., Blagnac (France), 2002.
- [34] T. Kagawa, Y. Saisu, R. Nishimura, and C. Youn, “Development of High Speed Response Laminar Flow,” *FLUCOME*, 2009.
- [35] CME, “Smart Digital Flowmeters,” 2000. [Online]. Available: <http://www.cme-flow.com/SmartFlowmeters.html>. [Accessed: 14-Nov-2015].

Anexos

Anexo A: Coeficientes de Sensibilidade

Função de caudal standard do caudalímetro em causa:

$$Q_{std}(P, T, \Delta P) = [B \times \Delta P + C \times (\Delta P)^2] * \frac{\mu_{std}}{\mu(T)} * \frac{T_{std}}{T} * \frac{P}{P_{std}}$$

$$Q_{std}(P, T, \Delta P) = [B \times \Delta P + C \times (\Delta P)^2] * \frac{\mu_{std}}{\frac{1,458 \times 10^{-5} \cdot T^{3/2}}{T + 104,4}} * \frac{T_{std}}{T} * \frac{P}{P_{std}}$$

$$Q_{std}(P, T, \Delta P) = [18,233\Delta P + 0,2621(\Delta P)^2] * \frac{1,7894 \times 10^{-5} \cdot (T + 104,4)}{1,458 \times 10^{-6} \cdot T^{3/2}} * \frac{288,18}{T} * \frac{P}{101325}$$

$$Q_{std}(P, T, \Delta P) = [18,233\Delta P + 0,2621(\Delta P)^2] * \left(12,014 \cdot T^{-\frac{1}{2}} + 1254,263 \cdot T^{-\frac{3}{2}} \right) * \frac{288,18}{T} * \frac{P}{101325}$$

i. Coeficiente de Sensibilidade de Pressão

$$c_P = \frac{\partial Q_{v_{std}}}{\partial P}$$

$$c_P = [18,233\Delta P + 0,2621(\Delta P)^2] * \left(12,014 \cdot T^{-\frac{1}{2}} + 1254,263 \cdot T^{-\frac{3}{2}} \right) * \frac{288,18}{T} * \frac{1}{101325}$$

$$c_P = \frac{\Delta P \cdot (\Delta P(0,00895575 \cdot T + 0,934981) + 0,623007 \cdot T + 65,042)}{T^{5/2}}$$

ii. Coeficiente de Sensibilidade de Temperatura

$$c_T = \frac{\partial Q_{v_{std}}}{\partial T}$$

$$c_T = [18,233\Delta P + 0,2621(\Delta P)^2] * \left(-6,007 \cdot T^{-\frac{3}{2}} - 1881,395 \cdot T^{-\frac{5}{2}} \right) * \frac{288,18}{T^2} * \frac{P}{101325}$$

$$c_T = \frac{\Delta P \cdot P \cdot (\Delta P(1,40247 - 0,00447787 \cdot T) - 0,311504 \cdot T + 97,563)}{T^{9/2}}$$

iii. Coeficiente de Sensibilidade de Pressão Diferencial

$$c_{\Delta P} = \frac{\partial Q_{v_{std}}}{\partial \Delta P}$$

$$c_{\Delta P} = [18,233 + 0,5242 \cdot \Delta P] * \left(12,014 \cdot T^{-\frac{1}{2}} + 1254,263 \cdot T^{-\frac{3}{2}} \right) * \frac{288,18}{T} * \frac{P}{101325}$$

$$c_{\Delta P} = \frac{0,00895575(\Delta P + 69,5651) \cdot P \cdot (T + 104,4)}{T^{5/2}}$$